

E.T.S de Ingeniería Industrial,  
Informática y de Telecomunicaciones

# ESTUDIO Y DISEÑO DE AEROGENERADOR SAVONIUS



Grado en Ingeniería  
en Tecnologías Industriales

Trabajo Fin de Grado

Autor: Jon Cerrada Garcés

Tutores: Pedro Villanueva Roldán

Beatriz Mendez Lopez

Pamplona, 21 de mayo de 2022

**upna**

*Universidad Pública de Navarra  
Nafarroako Unibertsitate Publikoa*



# Índice

RESUMEN .....	2
ABSTRACT .....	2
1. INTRODUCCIÓN .....	3
1.1 ENERGÍA EÓLICA .....	8
1.2 DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL .....	10
1.2.1 Introducción .....	10
1.2.2 Etapas de un análisis .....	11
1.2.3 Discretización espacial .....	11
1.2.4 Calidad de la malla .....	12
1.2.5 Condiciones de contorno e iniciales .....	13
1.2.6 Ecuaciones de movimiento .....	14
1.2.7 Discretización de las ecuaciones .....	14
1.2.8 OpenFOAM .....	15
1.2.9 Modelo de turbulencia .....	16
2. PLAN Y OBJETIVOS .....	18
3. ESTADO DEL ARTE .....	19
4. TRABAJO DE CAMPO .....	22
4.1 PLIEGO DE CONDICIONES FUNCIONAL .....	22
4.2 DISEÑO .....	24
4.2.1 ROTOR .....	24
4.2.2 COMPONENTES DEL AEROGENERADOR .....	28
4.3 CÁLCULOS .....	32
4.3.1 CFD (ROTOR) .....	32
4.3.2 ANALISIS DE TENSIONES (COMPONENTES DEL AEROGENERADOR) .....	43
4.4 COMPARACIÓN CON SAVONIUS .....	49
4.5 CONCLUSIONES .....	52
5. VISTA A FUTURO .....	52
<i>BIBLIOGRAFÍA</i> .....	53
ANEXOS .....	55
ANEXO 1 : FICHAS TÉCNICAS .....	55
PLANOS .....	61

## RESUMEN

En este trabajo se lleva a cabo el estudio y primer diseño de un aerogenerador de eje vertical (VAWT) tipo Savonius.

Por un lado, se estudia el comportamiento de un nuevo diseño geométrico del perfil y se comparan sus características con las del tradicional perfil en S de los aerogeneradores Savonius. Este estudio se realiza con el software de libre acceso OpenFOAM y en el se llevan a cabo diferentes simulaciones dinámicas.

Por otro lado, se realiza un primer diseño del aerogenerador. Mediante el programa SolidWorks se dibujan tanto los principales componentes del mecanismo como los planos. Además se hace un análisis de tensiones para comprobar el correcto funcionamiento de todas las piezas.

Los resultados muestran cuales son las variables geométricas que tiene que tener el perfil para que su funcionamiento sea óptimo. En cuanto a la comparación con el Savonius tradicional, no se consiguen superar sus características aerodinámicas. Un estudio y análisis mas avanzado se reservan para un futuro trabajo.

## ABSTRACT

In this work, the study and first design of a Savonius vertical axis wind turbine (VAWT) is carried out.

On the one hand, the behaviour of a new geometry profile design is studied and its characteristics are compared with those of the traditional S-profile of Savonius wind turbines. This study is carried out with the OpenFOAM free access software and in it different dynamic simulations are carried out.

On the other hand, a first design of the wind turbine is made. Using the SolidWorks program, both the main components of the mechanism and the plans are drawn. In addition, a stress analysis is carried out to check the correct operation of all the parts.

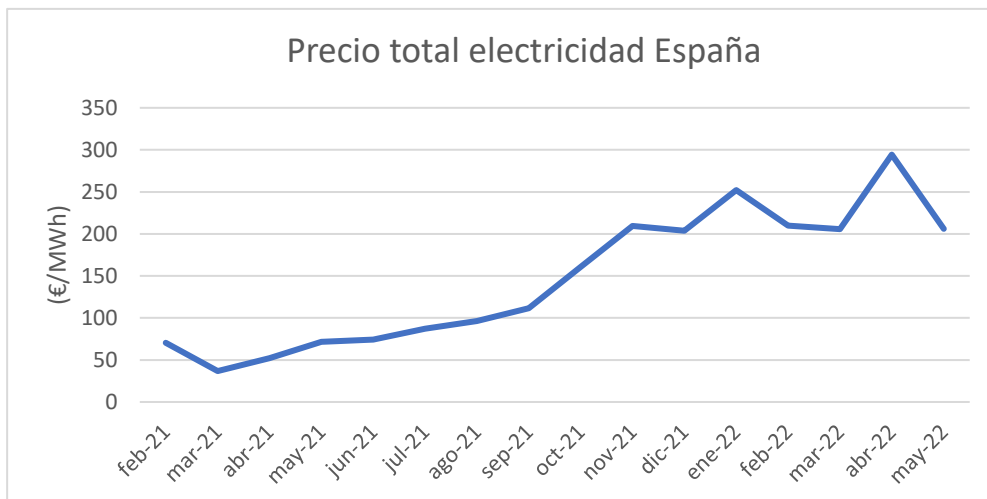
The results show which are the geometric variables that the profile must have so that its operation is optimal. As for the comparison with the traditional Savonius, its aerodynamic characteristics cannot be overcome. A more advanced study and analysis are reserved for future work.

## 1. INTRODUCCIÓN

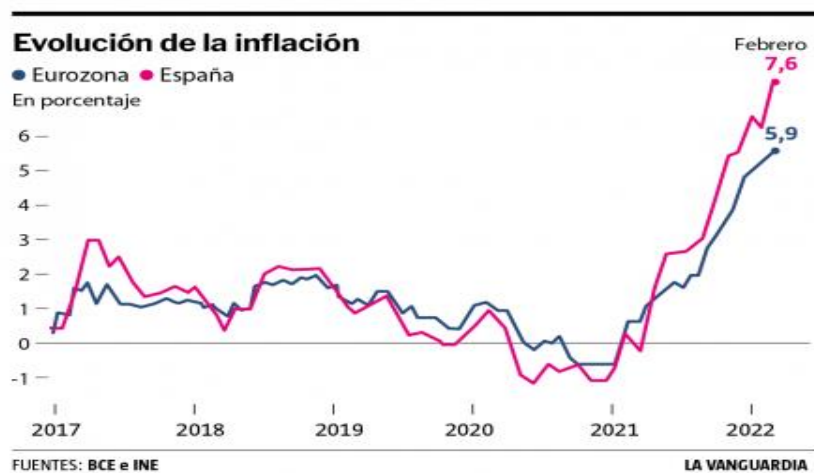
Antes de empezar con lo sustancial de este trabajo fin de grado, conviene saber primero la razón de su elección, y es lo que a continuación se tratará de explicar.

Un aerogenerador es una máquina diseñada para extraer energía del viento, por lo que lo realmente importante aquí es la energía. Hoy en día todas las sociedades se sustentan sobre esta, y se ha convertido de vital importancia tener un suficiente abastecimiento de ella. Gracias a la globalización hace tiempo que dejó de ser necesario el autoabastecimiento energético y un país que carezca de fuentes propias puede llegar a industrializarse, ¿Pero con que condiciones?

La crisis energética que actualmente se está viviendo en Europa ha hecho ver los peligros e inconvenientes que tiene depender la obtención de recursos energéticos de terceros países. Debido a conflictos geopolíticos con países exportadores de combustibles fósiles, los precios del petróleo y el gas han subido considerablemente, arrastrando con ellos el precio de la electricidad y todas las materias primas. Esto ha supuesto una inflación y un duro golpe a todas las economías Europeas.

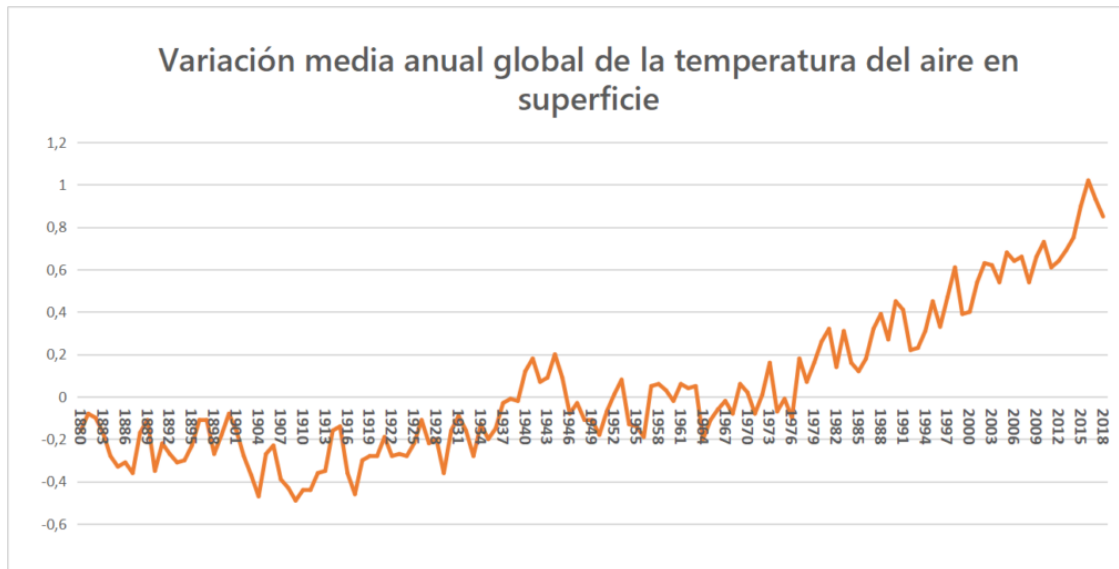


1. Fig. Evolución del precio de la electricidad en España. [1]



2. Fig. Evolución de la inflación en Europa y España. [2]

Esta dependencia en terceros países no es el único problema que estas fuentes energéticas fósiles traen, la contaminación y los efectos sobre el calentamiento global son también un factor a tener muy en cuenta. La quema de estos combustibles, entre otras cosas, está haciendo que la tierra y la naturaleza se estén viendo gravemente afectada, sin saber cuáles pueden ser las consecuencias.



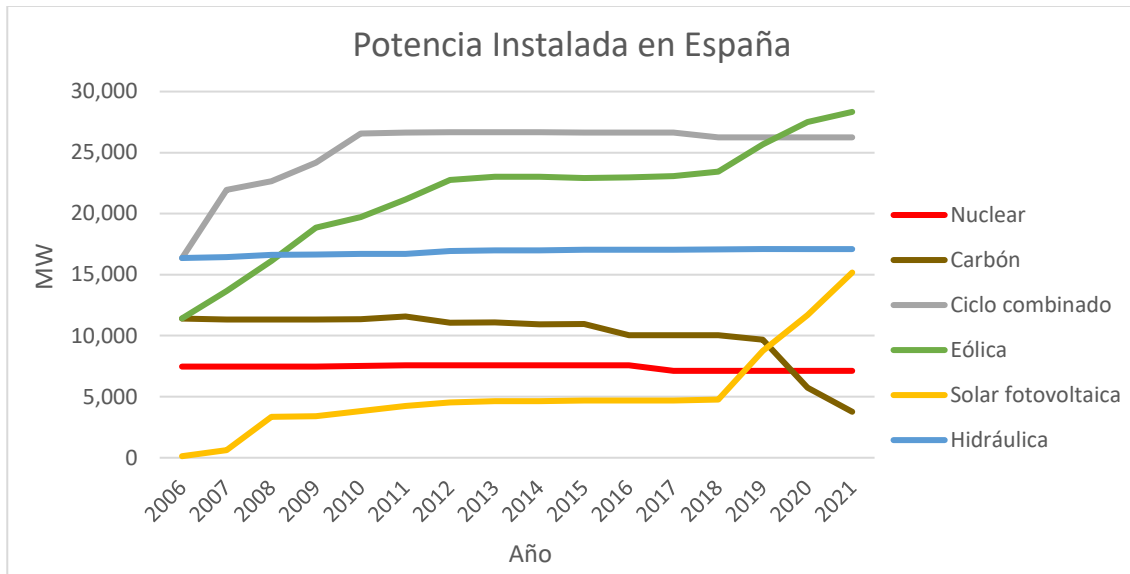
3. Fig. Variación media anual global de la temperatura del aire en superficie. [3]

Con el objetivo de evitar las consecuencias que estas fuentes fósiles tienen, tanto en Europa como en España ya se han puesto diversos planes para lograr una transición energética. En 2015 se selló el Acuerdo de París, una serie de objetivos para frenar el cambio climático manteniendo a la vez un sistema energético seguro y competitivo. Posteriormente, en 2016, la Comisión Europea presentó el paquete 'Energía Limpia para todos los europeos', cuyas propuestas y medidas tenían como finalidad acelerar dicha transición.

<b>Objetivos 2020</b>	20% reducción de emisiones de GEI frente a niveles de 1990	20% de energías renovables en la UE	20% de mejora de la eficiencia energética	
<b>Objetivos 2030</b>	40% reducción de emisiones de GEI frente a niveles de 1990	32% de energías renovables en la UE	32,5% de mejora de la eficiencia energética	15% para interconexiones eléctricas
<b>Objetivos 2050</b>	85-90% reducción de emisiones de GEI frente a niveles de 1990			

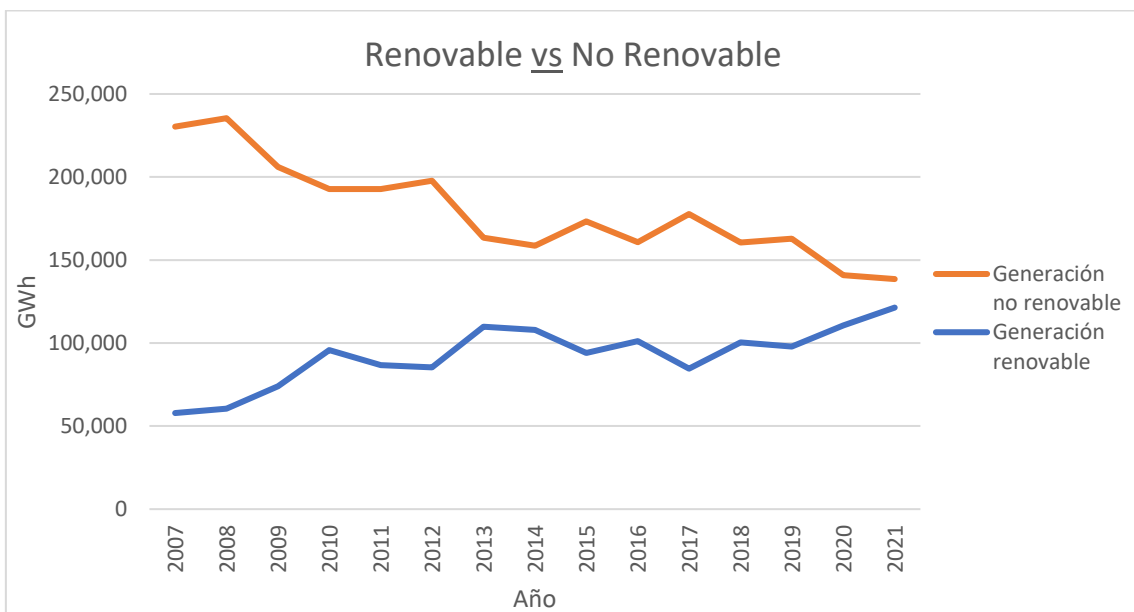
4. Fig. Objetivos europeos para la transición energética. [1]

Y lo cierto es que este cambio ya ha empezado. En España, a día de hoy, se instalan muchos más MW de energías renovables que no renovables. Este incremento se empezó a dar a comienzos de los años 2000, y a pesar que en 2012 hubo un importante parón, en 2018 se retomo la instalación de energías verdes de forma considerable.

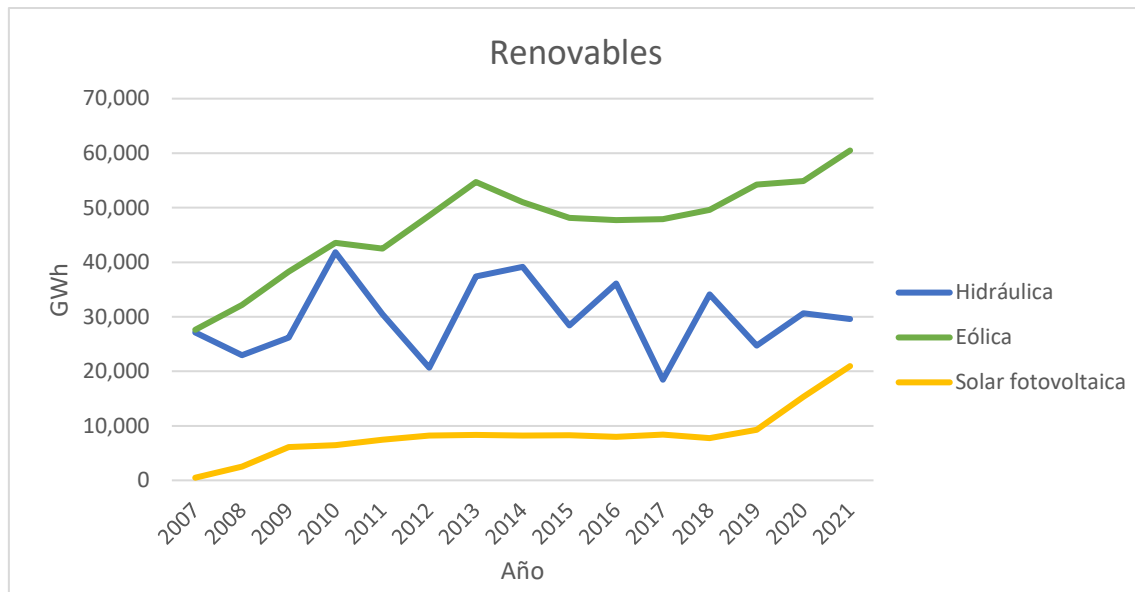


5. Fig. Potencia instalada en España. [1]

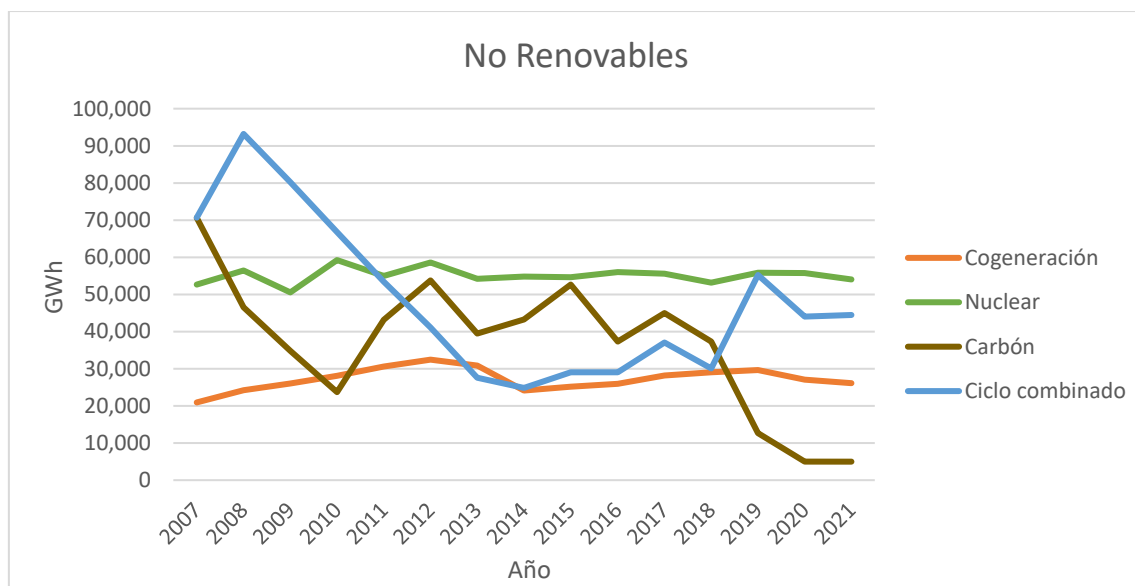
En cuanto a la producción, el cambio es claramente visible también. A pesar de que a nivel nacional hoy en día se sigue produciendo mas energía no renovable, estas cada vez se están igualando mas, y todo indica a que este año se acabará dando el sorpasso.



6. Fig. Comparativa de generación de energía renovable y no renovable. [1]



7. Fig. Generación de energía renovable en España. [1]



8. Fig. Generación de energía no renovable en España. [1]

Los datos también corroboran lo mencionado anteriormente respecto a la dependencia energética. A continuación se muestra el saldo de importación de electricidad internacional de España. Se ve que entorno a los años 2007-2012, cuando la inversión en renovables era notable, el saldo en importación era negativo, es decir, netamente hablando, España exportaba electricidad. Sin embargo en los años posteriores, coincidiendo con el parón renovable, el saldo pasó a ser positivo. A partir de 2018, conforme la eólica y la solar han vuelto a coger fuerza, han vuelto a cambiar las tornas, y España esta cerca de volver a ser un país exportador de electricidad.





9. Fig. Saldo de importación internacional de electricidad de España. [1]

Y para impulsar este cambio, cabe destacar la apuesta que la comunidad europea esta haciendo por financiar proyectos de búsqueda de conceptos innovadores. La eólica actual es un concepto muy maduro, y se esta trabajando mucho en conceptos más eficientes. Un ejemplo es el proyecto XROTOR.



10. Fig. Aerogenerador XROTOR

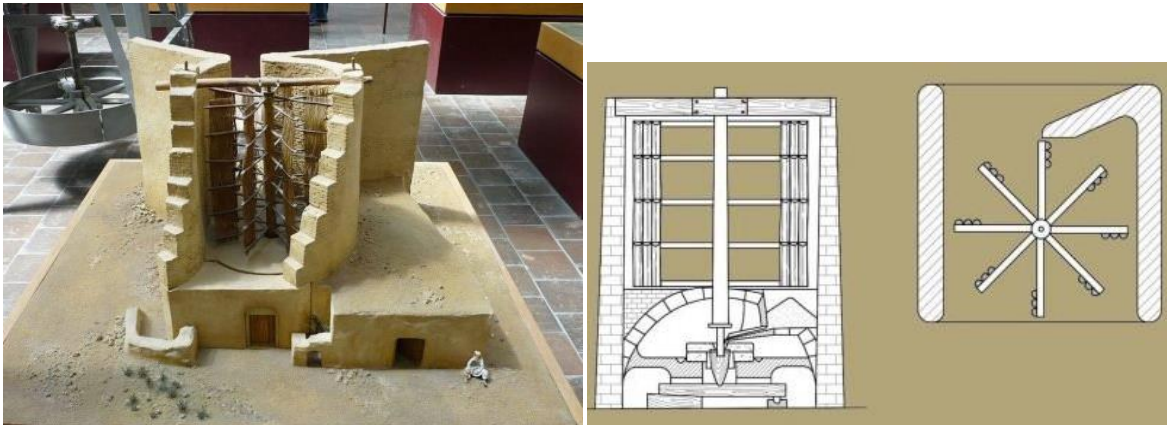
Jon Cerrada Garcés

El programa Horizon 2020 ha invertido grandes cantidades de dinero en financiar a entidades, como puede ser CENER, para investigar nuevos conceptos eólicos como este.

Como se ha visto, la eólica, la solar y la hidráulica son las fuentes verdes que mas peso tienen, siendo del aire de donde actualmente mas energía se extrae.

## 1.1 ENERGÍA EÓLICA

Hay que retroceder muchos miles de años atrás para llegar al comienzo de la utilización de la fuerza del viento. Desde aplicaciones cotidianas como aventar el trigo hasta aplicaciones de transporte para impulsar las falucas, antiguos barcos egipcios. Sin embargo, el primer uso del viento para hacer girar algo similar a un rotor y aprovechar la energía extraída se les adjudica a los persas. Utilizaban unas máquinas de rotor vertical con varias palas de madera o caña para elevar agua de irrigación y moler grano.



11. Fig. Antiguo molino persa. [9]

Para empezar a ver lo que se consideran los primeros molinos occidentales habría que esperar hasta la edad media, cuando en Grecia, Italia y España estos se empezaron a extender. A partir de aquí empezó una progresiva evolución de estas máquinas, hasta que a comienzos del siglo XX, de la mano de Poul La Cour, se empezaron a desarrollar los aerogeneradores que hoy en día conocemos.





13. Fig. Evolución histórica de los aerogeneradores

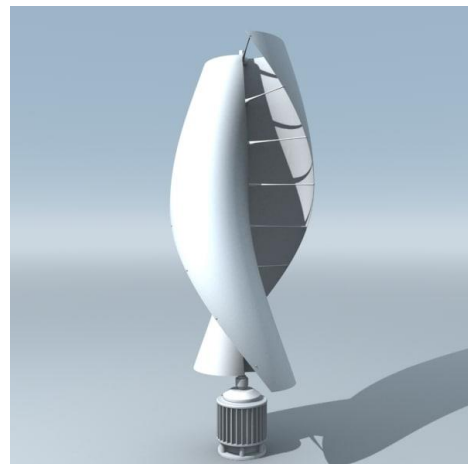
Actualmente, el sector eólico cuenta con una tecnología madura, y ya se hacen máquinas offshore de hasta 14 MW. Si bien es cierto que la gran mayoría de aerogeneradores son de 3 palas y eje horizontal, existen también diferentes variantes.

- Aerogeneradores de eje horizontal (HAWT):
  - 3 palas
  - 2 palas
  - 1 pala
  
- Aerogeneradores de eje vertical (VAWT):
  - Darrieus
  - Savonius

Los HAWT de 3 palas son los más utilizados porque son capaces de desarrollar altas eficiencias (entorno a 0.5) cerca del límite de Betz (de 0.59), la potencia máxima teórica que puede extraerse del viento. Sin embargo, también presentan algunos inconvenientes, los cuales los VAWT solucionan de forma sencilla. El principal de ellos es la necesidad de tener que estar orientando constantemente y de forma activa el aerogenerador de cara al viento. Esto hace necesario complejos sistemas de control y orientación que encarecen el precio de las máquinas. La ventaja de los rotores de eje vertical es que no hay necesidad de orientarlos, ya que debido a su geometría trabajan siempre de cara al viento.

Como se ha mencionado anteriormente, uno de los VAWT es el Savonius. Este es un aerogenerador, que a diferencia del resto de los mencionados en este trabajo, funciona principalmente gracias a la fuerza de arrastre (drag). Su tecnología no ha visto grandes evoluciones desde que en el año 1924 *Sigurd J. Savonius* lo inventase. Es por esto que en el presente trabajo se realizará un estudio y un primer diseño de estas originales máquinas.

Para estudiar estos mecanismos, en los que la interacción viento-máquina puede resultar ser muy compleja, se utiliza la dinámica de fluidos computacional.



14. Fig. Aerogenerador Savonius

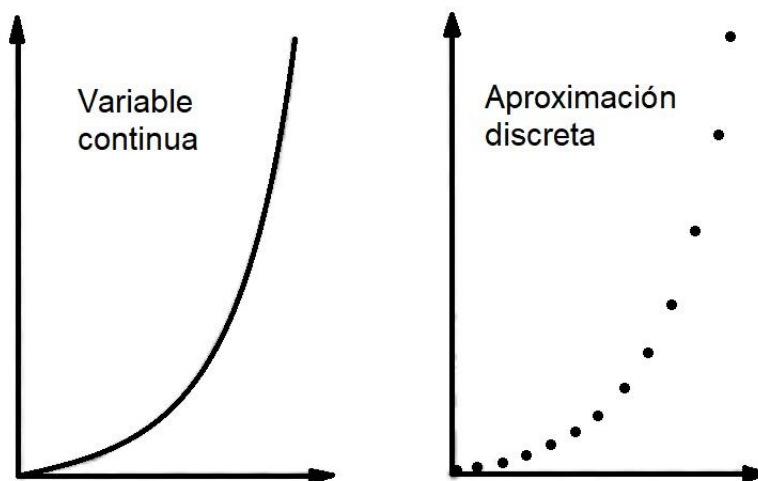
## 1.2 DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

### 1.2.1 Introducción

La dinámica de fluidos computacional, también conocido como CFD (Computational Fluid Dynamics), por sus siglas en inglés, es una de las ramas de la mecánica de fluidos que utiliza métodos y algoritmos para resolver y analizar problemas sobre el comportamiento de los fluidos.

Las ecuaciones que rigen la mecánica de fluidos son extremadamente complejas como para poder resolverlas todas ellas de manera analítica para todo el dominio de estudio. Es por esto que las ecuaciones diferenciales se suelen resolver de manera numérica mediante técnicas CFD. La resolución numérica es un cálculo que a diferencia del analítico obtiene soluciones aproximadas.

La dinámica de fluidos computacional, para poder resolver las ecuaciones, utiliza un sistema en el que aproxima las variables continuas utilizando un número finito de puntos. Este proceso se conoce como discretización. El programa de análisis CFD puede resolver estas complejas ecuaciones, aproximándolas a otras más simples y de tipo algebraico. Para que el resultado obtenido sea fiable, se impone un número elevado de iteraciones que proporcionan un error pequeño.



15. Fig. Variables continua y discreta

Los elementos principales de la dinámica de fluidos computacional (CFD) son:

- Discretización del flujo continuo, es decir, las variables de campo ( $\rho$ ,  $u$ ,  $v$ ,  $\omega$ ,  $p$ , ...)
- Las ecuaciones de movimiento también se discretizan, es decir, aproximadas en función de los valores de los nodos.
- El sistema de ecuaciones algebraicas se resuelve y se obtienen los valores de las variables en todos los nodos.

### 1.2.2 *Etapas de un análisis*

A continuación se verán los diferentes pasos que se realizan en un cálculo CFD, que son: preproceso o cálculos previos, discretización y solución de las ecuaciones de contorno y postproceso o análisis de los resultados.

1. **Preproceso:** Es el paso inicial de todo cálculo CFD. Se basa principalmente en la preparación de las herramientas necesarias para realizar la simulación. Esta etapa consta de dos partes fundamentales, crear la geometría que se va a simular y crear la malla y el tipo de mallado que rodeará la pieza. Además de las partes mencionadas anteriormente, también se establecen las condiciones de contorno y la elección de las variables, las cuales se deben escoger con especial cuidado, ya que serán los valores que nos interesa obtener.
2. **Solución de las ecuaciones de contorno:** Es la parte fundamental de todo análisis CFD, ya que es en este paso donde se solucionan numéricamente las ecuaciones que gobiernan el problema proporcionando los resultados que interesa conocer.
3. **Análisis de los resultados:** Una vez se han obtenido los resultados del paso 2, que muestran el valor de las variables del fluido ( $\rho$ ,  $u$ ,  $v$ ,  $\omega$ ,  $p$ , ...) en cada nodo de la malla. Debido a que existen miles o incluso millones de nodos en una malla, se hace imprescindible reducir la cantidad de información a la más fundamental para poder interpretar el resultado. En este paso se suele representar gráficamente las variables para que el resultado se interprete de forma más sencilla. También se pueden comparar los resultados con otros casos simulados o con experimentos.

### 1.2.3 *Discretización espacial*

La discretización espacial del dominio es el primer paso cuando se hace un cálculo con dinámica de fluidos computacional y se hace para que posteriormente se pueda calcular sobre la misma la aproximación numérica de los flujos convectivos y difusivos, así como las fuentes. Existen multitud de métodos para poder discretizar el problema, que se suelen agrupar en tres categorías principales: diferencias finitas, volúmenes finitos y elementos finitos.

Todos estos métodos requieren que previamente se realice una discretización geométrica (espacial) para que posteriormente se pueda realizar la discretización de las ecuaciones que gobiernan el fluido. Esta discretización espacial es el mallado que hay que aplicar a la geometría que se quiere analizar. Existen tres tipos de mallado:

- **Mallados estructurados:** Cada punto de la malla está inequívocamente identificado por los índices  $i$ ,  $j$ ,  $k$ , en coordenadas cartesianas. Las celdas de la malla son cuadriláteros en 2D y hexaedros en 3D.
- **Mallados no estructurados:** Las celdas y los nodos de la malla no tienen un orden particular, es decir, las celdas o nodos cercanos a uno dado, no pueden identificarse directamente por sus índices. Los elementos de la malla, en este caso, son una mezcla de cuadriláteros y triángulos en 2D y tetraedros y hexaedros en 3D.

- **Mallados híbridos:** Combina los dos mallados anteriores. Utiliza el mallado estructurado en puntos cercanos al perfil donde se necesita más precisión y el mallado no estructurado se utiliza en zonas donde se necesite menos precisión.

#### 1.2.4 Calidad de la malla

Una vez se ha realizado el mallado, es importante asegurarse que los elementos creados tengan una cierta calidad para que los resultados obtenidos sean satisfactorios. Existen algunos parámetros que permiten comprobar que la calidad de la malla sea aceptable:

- **Densidad de malla:** Se define como el número de elementos por unidad de área en una malla. Normalmente, cuanto más pequeños son los elementos, más real es la solución, de hecho, si los elementos fueran diferenciales la solución sería exacta. El problema es que las ecuaciones físicas se deben resolver para cada elemento de la malla, por eso el tiempo de computación aumenta al aumentar el número de nodos. La solución para poder conseguir resultados precisos y a la vez no aumentar considerablemente el tiempo de computación, es reducir la densidad del mallado en las zonas que no interesen en el análisis, es decir, en las zonas alejadas del perfil alar, y aumentar la densidad del mallado en aquellas zonas donde se necesite una mayor precisión en los resultados. Así pues como puede verse en la figura, conforme nos acercamos al perfil la densidad de la malla aumenta progresivamente.
- **Ortogonalidad:** Este parámetro mide si los ángulos que se forman en las intersecciones de las líneas de la malla distan mucho de ser  $90^\circ$ . Este parámetro se utiliza para medir el error de discretización, ya que cuanto menos ortogonales sean los elementos de la malla, mayor será el error de discretización.
- **Asimetría o skewness:** Mide si los elementos de una malla son simétricos o asimétricos. Al contrario de lo que sucede con la ortogonalidad, para valores altos de Skewness se consiguen grandes errores de discretización.
- **Suavidad o smoothness:** En algunas ocasiones, es necesario separar el dominio global en subdominios más pequeños para poder aumentar la densidad de la malla en algunas zonas o para cambiar la direccionalidad de los elementos. Para conseguir una buena calidad de malla es necesario que las celdas adyacentes entre dos subdominios sean parecidas en tamaño. La diferencia de tamaño entre dos celdas adyacentes no debería ser superior al 20 %. Si no se realiza correctamente este paso, puede haber problemas a la hora de discretizar y puede llevar a que el cálculo diverja.
- **Aspect Ratio (AR):** Este parámetro indica la relación entre el lado más largo y el más corto del elemento. El valor máximo aceptable de AR depende de la zona en la que se encuentre la celda. Si la celda se encuentra en la dirección del flujo se aceptan valores de AR de 10, y si además está resolviendo la capa límite, se pueden alcanzar valores de AR mayores de 100.

- **Forma de la malla:** Dependiendo del tipo de perfil alar que se esté analizando se pueden distinguir dos tipos de mallas. La malla de tipo C, para perfiles con borde de fuga afilado y la de tipo O, para perfiles con borde de fuga romo.
- **Distancia al Far-field:** El Far-field es la región que delimita el mallado, y para hacer análisis CFD, se sabe que el tamaño del dominio afecta a la convergencia de las simulaciones.
- **Spacing:** Normalmente se busca un equilibrio entre el coste computacional y la precisión de los resultados. La distancia adimensional hasta la pared para un flujo se define de la siguiente manera:

$$y^+ \equiv \frac{u \cdot y}{\nu}$$

Donde:

- $u$  = Velocidad de fricción en la pared más cercana.
- $y$  = Distancia a la pared más cercana.
- $\nu$  = Viscosidad cinemática del fluido.

Un flujo más rápido cerca de la pared producirá valores más altos de  $y^+$ , por lo que el tamaño de las celdas cerca de la pared deberá ser menor. Para asegurar el buen funcionamiento del modelo turbulento es necesario obtener  $y^+ \approx 1$ .

### 1.2.5 Condiciones de contorno e iniciales

Una vez se ha creado la malla, y antes de resolver las ecuaciones de transporte es imprescindible imponer una serie de soluciones al problema en sus contornos que sirvan como punto de partida para que a partir de ellas se pueda calcular todo el campo interno obteniendo una solución única. Estas soluciones se conocen como condiciones de contorno o BC por sus siglas en inglés, (Boundary Conditions). Dependiendo del problema se impondrán una serie de condiciones u otras.

Las condiciones iniciales determinan el estado de las variables fluidas en el instante  $t=0$ . Cuanto más cercana esté la condición inicial a la solución del problema, menor será el tiempo necesario empleado para llegar a la convergencia de las ecuaciones, por lo que se reduce el riesgo de que el problema se vuelva inestable y se aumentan las probabilidades de llegar a la solución. En aerodinámica se suelen imponer como valores iniciales las condiciones de flujo libre en velocidad, presión, densidad y temperatura.

Las condiciones de contorno se pueden clasificar en:

- **Condiciones de contorno de flujo libre:** Pueden ser de entrada, de salida o de entrada/salida. Las condiciones de contorno de entrada de flujo se especifican mediante las condiciones en el infinito ( $\rho_\infty, \mu_\infty, u_\infty, v_\infty, \omega_\infty, p_\infty, T_\infty$ ).
- **Condiciones de contorno de pared:** Condiciones de contorno de pared: Modelan el comportamiento del flujo en las zonas cercanas a la superficie. Se suele imponer la

condición de contorno de no deslizamiento (velocidad nula en el punto de contacto con la geometría,  $u=0$ ) y de tangencia (la velocidad normal a la superficie es cero).

### 1.2.6 Ecuaciones de movimiento

Como se ha comentado previamente, la mecánica de fluidos es una rama de la física que estudia el movimiento de los fluidos alrededor de un cuerpo y las fuerzas que actúan sobre el mismo, mientras que el CFD es un método de resolución de las ecuaciones de la mecánica de fluidos. Por ese motivo y para poder entender mejor este método de resolución, aquí se muestran las ecuaciones principales que rigen la mecánica de fluidos.

- **Conservación de la masa:**

$$\frac{d}{dt} \int_{V_f} \rho(\vec{x}, t) dV = \frac{d}{dt} \int_{V_c} \rho(\vec{x}, t) dV + \int_{S_c} \rho(\vec{x}, t) (\vec{v} - \vec{v}_c) \cdot \vec{n} dS$$

- **Conservación de la cantidad de movimiento:**

$$\rho \vec{g} + [-\nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}_{ij}] = \rho \frac{D\vec{v}}{Dt}$$

- **Conservación de la energía:**

$$\rho c_V \frac{DT}{Dt} = k \nabla^2 T + \phi$$

### 1.2.7 Discretización de las ecuaciones

Como se ha comentado previamente, las técnicas CFD resuelven las ecuaciones de la mecánica de fluidos de manera discreta. Existen distintos métodos de discretización de las ecuaciones para poder convertir las ecuaciones diferenciales en algebraicas que, aunque no den una solución exacta, proporcionan valores aproximados. Los métodos más conocidos son Diferencias Finitas, Volúmenes Finitos y Elementos Finitos.

El método de los Volúmenes Finitos es el más extendido para el análisis CFD, ya que plantea las ecuaciones de conservación en su forma integral en pequeños volúmenes de control (celdas), donde la incógnita se encuentra en el centro de cada celda, lo que permite la discretización temporal y espacial. La principal ventaja de este método es que la discretización espacial se lleva a cabo directamente en el espacio físico del problema. Por lo tanto, a diferencia de lo que ocurre en el método de las diferencias finitas, no importa el sistema de coordenadas utilizado. Además este método es mucho más flexible, ya que se puede aplicar en mallas estructuradas y no estructuradas. Es interesante resaltar que bajo ciertas condiciones, el método de los Volúmenes Finitos es equivalente al de las Diferencias Finitas.



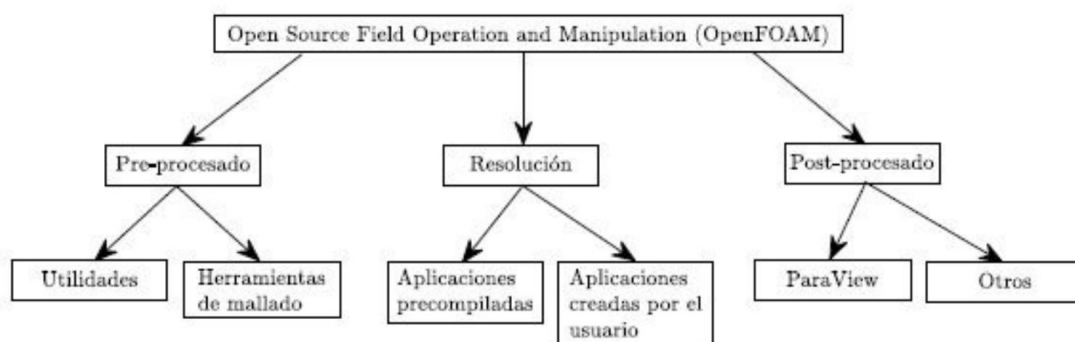
### 1.2.8 OpenFOAM

OpenFOAM®(Open Source Field Operational and Manipulation) es el software de código abierto más usado para cálculos de dinámica de fluidos computacional (CFD), propiedad de OpenFOAM Foundation y distribuido exclusivamente bajo la licencia GPL (General Public Distribution).

OpenFOAM está basado en el lenguaje de programación C++ y en esquemas de Volúmenes Finitos y se usa principalmente para crear ejecutables conocidos como aplicaciones. En cada versión se incluyen una serie de aplicaciones precompiladas que cubren una gran cantidad de problemas, aunque el usuario tiene la libertad de modificar el código de cada una para adaptarlo a sus necesidades. Además OpenFOAM permite que se creen nuevas aplicaciones por los usuarios que tengan un conocimiento mínimo de la física y las técnicas de programación necesarias. Las aplicaciones se pueden agrupar en dos categorías:

- **Solvers:** Programas para resolver problemas de mecánica de fluidos continuos.
- **Utilidades:** Programas que permiten realizar el preproceso y el postproceso de los casos a resolver mediante los solvers. Su tarea es la manipulación de datos.

OpenFOAM se puede dividir en 3 grandes módulos dependiendo de la fase de resolución del problema: preprocesado, discretización y resolución de las ecuaciones de contorno o postprocesado.



16. Fig. Esquema de la estructura de OpenFOAM.

Por otro lado, los ficheros de OpenFOAM también siguen una estructura determinada, en la que se crean tres carpetas necesarias para poder lanzar el cálculo:

- **Carpeta 0:** En este directorio se encuentran las condiciones de contorno y las iniciales para las variables que el solver necesita. Para cada tipo de contorno se le aplicará una u otra condición.
- **Carpeta constant:** Esta carpeta contiene los archivos que definen las propiedades dimensionales del fluido de trabajo, como la viscosidad dinámica y cinemática, el tipo de tratamiento turbulento que se le va a aplicar, además de la información de la geometría, la malla, los nombres impuestos a cada parte del contorno y en el caso de se vaya a utilizar una malla móvil, también se puede encontrar el archivo referente a la configuración de este tipo de malla (dynamicMeshDict). El programa requiere unas condiciones de contorno iniciales para los parámetros más importantes del fluido, por eso es necesario especificar los vectores iniciales y campos dentro de la carpeta de

tiempo en el instante inicial. Una vez hecho esto, se crean nuevos directorios de tiempo (los instantes de tiempo se definen en un archivo de la carpeta system) que contienen la solución para los mismos parámetros para los tiempos requeridos.

- **Carpeta system:** En la carpeta system se almacena la información respectiva al cálculo de la simulación, como son los esquemas de discretización que se han comentado en apartados anteriores (fvSchemes), los solvers internos para resolver las variables (fvSolutions), como se va a descomponer el dominio de cálculo en el caso de que se vayan a utilizar varios procesadores para el cálculo, lo que se suele hacer en los casos con mucho costo computacional, como en el caso de perfiles con VG (decomposeParDict) y los parámetros de tiempo de simulación, cada cuanto se ha de escribir la información, etc.

### 1.2.9 Modelo de turbulencia

En OpenFOAM las simulaciones turbulentas se realizan mediante modelos que se encuentran en la librería TurbulenceModels. Esta librería proporciona modelos para densidades constantes y variables y modelos para flujos monofásicos y multifásicos. OpenFOAM incluye los siguientes tipos de simulación turbulenta: Reynolds Average Navier-Stokes (RANS), Direct Numerical Simulation (DNS), Large Eddy simulation (LES), Detached Eddy simulation (DES). A continuación se explicará el modelo que va a ser usado en este trabajo:

- **Modelo k- $\omega$  Shear-Stress Transport:**

Este modelo se desarrolló como una alternativa al modelo k- $\omega$  ya que tiene mayor sensibilidad para gradientes de presión adversos que el modelo k- $\omega$ , y además proporciona mejores resultados para números de Reynolds bajos y en zonas cercanas a la pared. En este modelo, además de la energía cinética turbulenta, k, se utiliza la disipación específica turbulenta,  $\omega$ , que determina la escala de la turbulencia. El principal motivo por el que este modelo es mejor en estos casos es debido a que los demás modelos no tienen en cuenta el transporte de la tensión de Reynolds, lo que provoca una sobre predicción de la viscosidad cinemática. El uso de la formulación k- $\omega$  en la parte interna de la capa límite hace que el modelo sea aplicable en toda la zona hasta la pared a través de la subcapa viscosa, además el modelo k- $\omega$  SST puede ser usado como modelo de turbulencia para números de Reynolds bajos sin necesidad de añadir funciones de amortiguación. El modelo SST es la combinación de los modelos turbulentos k- $\omega$  y k- $\epsilon$ , lo que permite que se pueda cambiar del modelo k- $\omega$  en regiones próximas a la pared al modelo k- $\epsilon$  en regiones alejadas de la pared a través de funciones bien definidas. Este modelo, sin embargo, produce niveles de turbulencia muy grandes en regiones con tensiones normales elevadas, como en regiones con grandes aceleraciones.

La ecuación de disipación específica turbulenta es la siguiente:

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \omega) - \nabla \cdot (\rho D_{\omega} \nabla \omega) = \frac{\rho \gamma G}{\nu} - \frac{2}{3} \rho \gamma \omega \nabla \cdot u - \rho \beta \omega^2 - \rho (F_1 - 1) C D_{k\omega} + S_{\omega}$$

Y la ecuación de la energía cinética turbulenta es:

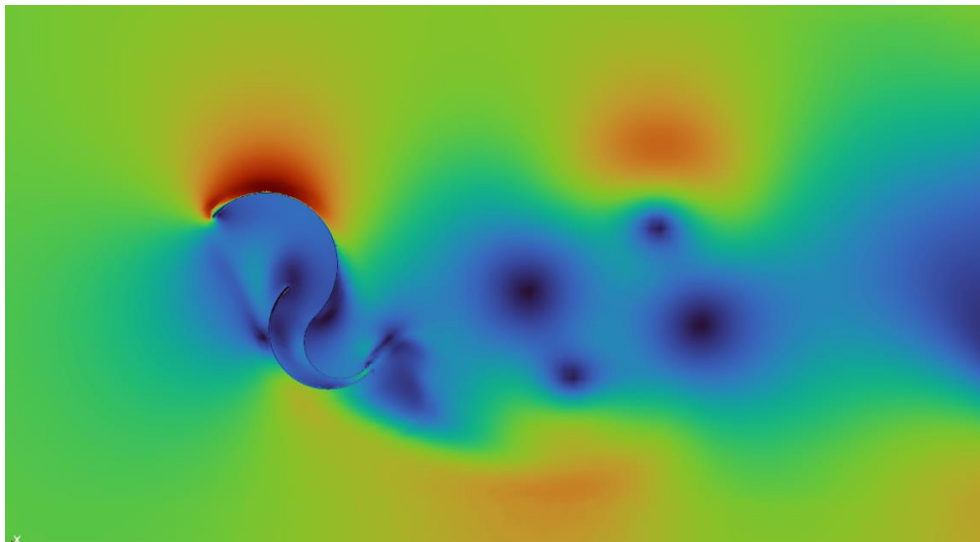
$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u k) - \nabla \cdot (\rho D_k \nabla k) = \rho G - \frac{2}{3} \rho k \nabla \cdot u - \rho \beta^* \omega k + S_k$$

Donde la viscosidad turbulenta se obtiene de la siguiente forma:

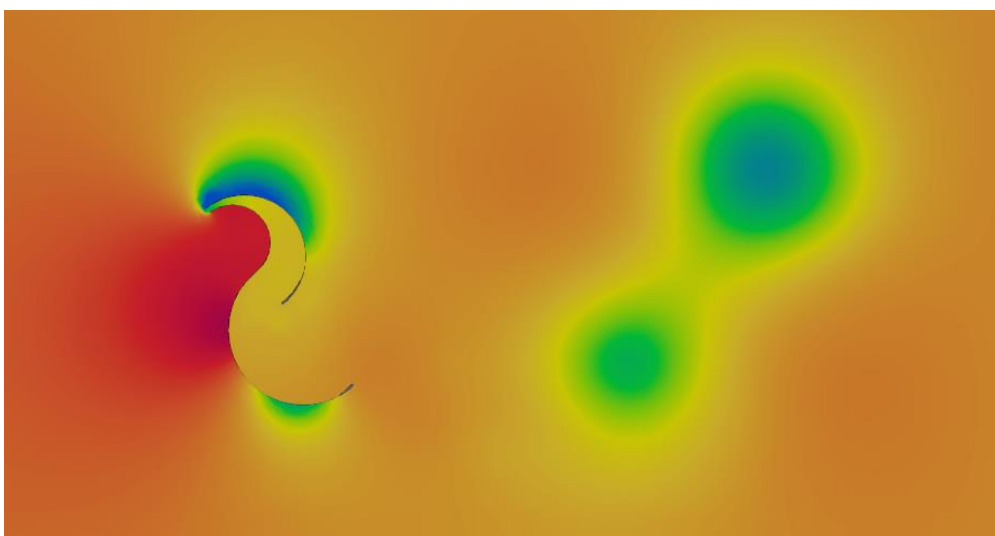
$$\nu_t = a_1 \frac{k}{\max(a_1 \omega, b_1 F_{23} S)}$$

Los coeficientes del modelo k- $\omega$  SST son los siguientes:

$\alpha_{k1}$	0.85
$\alpha_{k2}$	1.0
$\alpha_{\omega 1}$	0.5
$\alpha_{\omega 2}$	0.856
$\beta_1$	0.075
$\beta_2$	0.0828
$\gamma_1$	5/9
$\gamma_2$	0.44
$\beta^*$	0.99
$a_1$	0.31
$b_1$	1.0
$c_1$	10.0



a) Velocidad del viento



b) Presión del viento

17. Fig. Resultados de la simulación CFD con modelo de turbulencias k- $\omega$  SST.

## 2. PLAN Y OBJETIVOS

Este trabajo fin de grado tiene como objetivo principal el estudio y primer diseño de un aerogenerador de eje vertical (VAWT) tipo Savonius capaz de suministrar una potencia de 1 kW.

Uno de los grandes problemas de los Savonius es su baja eficiencia, y esto ha hecho que en los últimos años se hayan realizado una gran cantidad de estudios tratando de mejorarla. En este proyecto se da continuidad al esfuerzo de mejora del rendimiento, y gran parte del trabajo se basa en el análisis del comportamiento de un nuevo diseño de perfil aerodinámico. Este diseño es una idea propia surgida del intento de mejorar el tradicional perfil en forma de S. La falta de información sobre las propiedades aerodinámicas hace necesario el uso de cálculos CFD para poder caracterizar dicho perfil. Estos se realizan mediante el software OpenFOAM llevando a cabo una serie de simulaciones dinámicas. Gracias a esta herramienta se encuentra un diseño óptimo del nuevo perfil y se comparan los resultados obtenidos con los de un Savonius tradicional. Para encontrar el diseño óptimo se han ido cambiando diferentes variables del perfil y calculando la potencia extraída con cada variante. De esta forma se ha obtenido un diseño final que ha sido el que se ha comparado con el clásico perfil en S.

En este proyecto también se realiza un primer diseño del aerogenerador. Mediante SolidWorks se han dibujado la componentes principales del mecanismo y posteriormente se han realizado sus respectivos planos. El foco principal de este trabajo es el diseño del rotor ayudándose del CFD. El diseño completo de todo el aerogenerador se reserva para un futuro trabajo.

Por último, uno de los objetivos de fondo ha sido poner en contexto sobre la situación energética actual y destacar la importancia que tiene estudiar y desarrollar tecnología vinculada a este ámbito. Escoger este tema para la realización del TFG no ha sido una casualidad sino una acción fruto de la búsqueda de las principales preocupaciones de la sociedad actual.

### 3. ESTADO DEL ARTE

El aerogenerador Savonius fue inventado por el finlandés Sigurd J. Savonius en el año 1924 y patentado en 1929. Se compone de dos semicilindros del mismo diámetro, de ejes paralelos acoplados al eje de giro y separados una cierta distancia. Las fuerzas que ejerce el viento en la parte cóncava y convexa son diferentes y ello hace que el conjunto gire alrededor del eje.



18. Fig. Foto de Sigurd J. Savonius

Para el rotor Savonius de dos palas o canaletas, el coeficiente de arrastre es aproximadamente la unidad para el curvado cóncavo (intradós), y oscila entre 0.12 y 0.25 para la parte opuesta (extradós) a donde sopla el viento. Esto hace que estas máquinas consigan desarrollar coeficientes de potencia ( $C_p$ ) entorno a 0.18 y trabajen a un  $\lambda$  de 0.8.

$$C_p = \frac{\text{Potencia}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3} \quad \lambda = \frac{\omega \cdot R}{v}$$

Las turbinas Savonius se utilizan cuando el costo o la fiabilidad son mucho más importantes que la eficiencia energética. La mayoría de los anemómetros son rotores Savonius por esta razón, ya que la eficiencia es irrelevante a la hora de medir la velocidad del viento. Se han utilizado turbinas Savonius mucho más grandes para generar energía eléctrica en boyas de aguas profundas, que necesitan pequeñas cantidades energéticas y reciben muy poco mantenimiento. El diseño se simplifica porque, a diferencia de las turbinas eólicas de eje horizontal (HAWT), no se requiere ningún mecanismo de orientación para permitir el cambio de dirección del viento y la turbina se enciende automáticamente. Este tipo de máquinas de eje vertical son buenas para bombear agua y otras aplicaciones de alto torque y bajas rpm y generalmente no están conectadas a la red eléctrica.

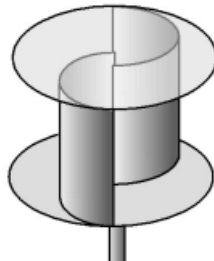
A pesar de ser una tecnología no muy evolucionada desde su invención, si se han estudiado formas para tratar de aumentar su eficiencia. A continuación se muestran las principales conclusiones a las que se ha llegado:

- **Número de palas.**

El artículo '*An experimental study on improvement of Savonius rotor performance*' [4] concluye que el número de palas óptimo para un aerogenerador de tipo Savonius es de 2. Se estudian rotores de diferentes esbelteces con 2, 3 y 4 palas y se ve de forma clara que los de dos palas son capaces de extraer mayor potencia del viento.

- **Platos en los extremos.**

En cuanto al beneficio o perjuicio de colocar platos en los extremos de los rotores, son muchos los estudios que concluyen resultados positivos [4] [5] [6]. Se observa que al poner estas placas el coeficiente de potencia sube independientemente de la velocidad del aire. Sobre la forma que estas placas deben tener, la geometría cilíndrica es la que mejor funciona [6]. Además, tras analizar platos cilíndricos de diferentes diámetros se observa que un valor de 1.1 veces el diámetro de las palas ( $D$ ) es el ideal para extraer mayor potencia [5].



19. Fig. Savonius con platos

- **Esbeltez.**

Sobre la influencia de la esbeltez hay división de opiniones. Por un lado se puede leer que cuanto mayor sea la esbeltez mejor será el rendimiento del aerogenerador [4]. Por otro lado, se observa que una esbeltez de 0.7 puede tener los mayores beneficios. A pesar de no haber unanimidad en este aspecto, se ve que cuanto mayor sea la esbeltez mayor será la velocidad de giro del rotor. Esto plantea la opción de que si se quiere obtener un Savonius que gire a velocidades bajas (bien para reducir ruidos o para obtener pares más altos) se puede optar por un diseño de esbeltez reducida, cercana a 0.7.

- **Número de etapas.**

En este aspecto, la literatura indica que dos etapas es la variante con mayores ventajas [4] [6] [7]. Esto ayuda a obtener un par más constante y por tanto a reducir ruidos y vibraciones.

- **Superposición de las palas (overlap).**

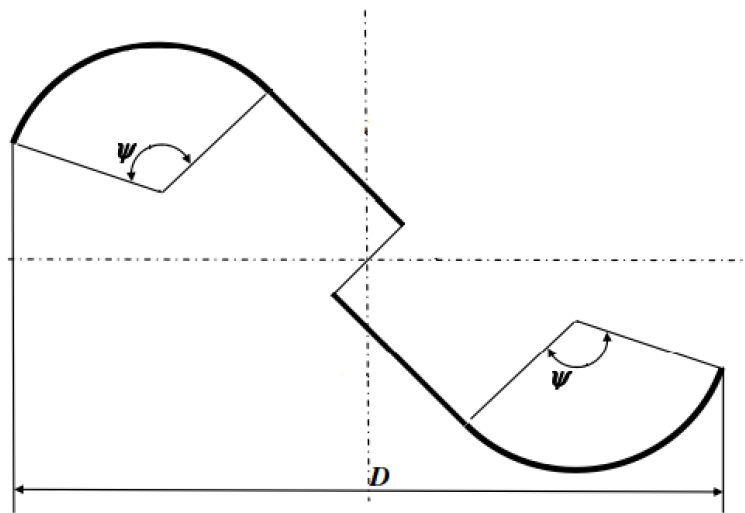
La superposición de las palas es un factor que tampoco está del todo claro su influencia. En los experimentos llevados a cabo por *Fujisawa* [9] se observa que los mayores valores del  $C_p$  se dan con una superposición de 0.15. Por otro lado, es común encontrar en la literatura la obtención de mejores resultados cuando no hay superposición [4] [5].



20. Fig. Palas superpuestas

- **Ángulo de arco de pala.**

El estudio realizado por *Kamoji* [5] muestra que aplicar un ángulo de arco de pala ( $\Psi$ ) puede ser beneficioso para el rendimiento del aerogenerador.



21. Fig. Ángulo de arco de pala

- **Inclinación de las palas.**

En cuanto a la inclinación de las palas, existen resultados que muestran que una inclinación de  $5^\circ$  puede ayudar a la mayor extracción energética del viento [8].

- **Valores de números de Reynolds.**

Respecto al número de Reynolds se observa que cuanto valores más altos mayores coeficientes de potencia se extraen [6].

- **Diseño helicoidal.**

Los resultados indican que un diseño de palas helicoidal es mejor que uno de palas rectas [6]. A pesar de que esta conclusión es clara, no siempre se tiende a realizar este tipo de diseños. La razón es que los procesos constructivos se complican de forma considerable, aumentando a su vez el precio del rotor. El hecho de que una de las principales ventajas de estos aerogeneradores sea su sencillez y su bajo coste hace que en la práctica gran parte de los Savonius se hagan de palas rectas.

## 4. TRABAJO DE CAMPO

### 4.1 PLIEGO DE CONDICIONES FUNCIONAL

	CONDICIÓN		SOLUCIÓN
ESPECIFICACIONES DE USO	Autónomo (sin necesidad de ser operado)		El par estático que genera el viento en las palas es suficiente para empezar a hacer girar el rotor. No necesita mantenimiento periódico excesivo.
ESPECIFICACIONES DEL SISTEMA	Potencia 1kW		El rotor tiene las características aerodinámicas necesarias para generar 1 kW de potencia. El coeficiente de potencia ( $C_p$ ) es suficientemente bueno.
ESPECIFICACIONES CONSTRUCTIVAS FUNCIONALES	Fabricación sencilla		La fabricación de las palas es mediante laminas de aluminio. Su geometría no tiene curvas complejas que dificulten su fabricación. Todo los componentes se fabrican mediante métodos de fabricación comunes.
	Componentes estándar		No hay piezas de una complejidad extraordinaria.
	Deterioro		El diseño es robusto y no presenta puntos débiles. Los metales serán superficialmente tratados para evitar el deterioro.
ESPECIFICACIONES DEL ENTORNO	ENTORNO INTERIOR	Temperatura de uso de los componentes 55 °C	Dentro de la carcasa fluye una corriente de aire mediante convección natural.
	ENTORNO EXTERIOR	Condiciones climáticas adversas	Los metales tienen tratamientos superficiales para no oxidarse. Anodizado.
CICLO VITAL	Transmitir potencia desde las palas hasta el transformador		Un eje será el encargado de transmitir la potencia de las palas al generador. Una multiplicadora con engranajes planetarios desarrolla una multiplicación x16. Gracias a esto se consigue una velocidad en el eje de salida de entorno a 1500 rpm.



FUNCIONES DE ADAPTACIÓN	Tamaño limitado		Su tamaño no es superior a 1.5m de ancho ni 3m de alto.
	Seguridad		No genera peligro en su entorno. No tiene piezas que sobresalgan de forma peligrosa.
GAMA OPERACIONES	REPOSO	Capacidad de autoarranque	El par estático que genera el viento en las palas es suficiente para empezar a hacer girar el rotor.
	TRABAJANDO	Extraer energía del viento	El perfil aerodinámico de las palas es capaz de extraer energía del viento haciendo girar el rotor con suficiente par.
		Vibraciones	Para evitar vibraciones, la unión del rotor a la base fija del aerogenerador se hace mediante almohadillas de caucho.
		Transformación de energía eléctrica en mecánica	Hay un generador eléctrico que transforma la energía mecánica del eje en energía eléctrica.
		Ruido	Para evitar el ruido producido por las vibraciones están las uniones con caucho antivibración mencionadas anteriormente. El ruido aerodinámico se evita no permitiendo que el rotor gire a excesiva velocidad.
	MOVIMIENTOS	Girar	El rotor es capaz de girar respecto de un eje gracias a una serie de rodamientos tanto axiales como radiales.
	FUERZAS	Fuerza del viento	Soporta los cerca de 750 N de fuerza que le ejerce el viento. El aerogenerador no se vuelca.
		Fuerza de la gravedad	Los componentes están diseñados para soportar el peso de la estructura.
	MOMENTOS	Momento generador por el viento	Los componentes están diseñados para soportar el par generado por el viento.

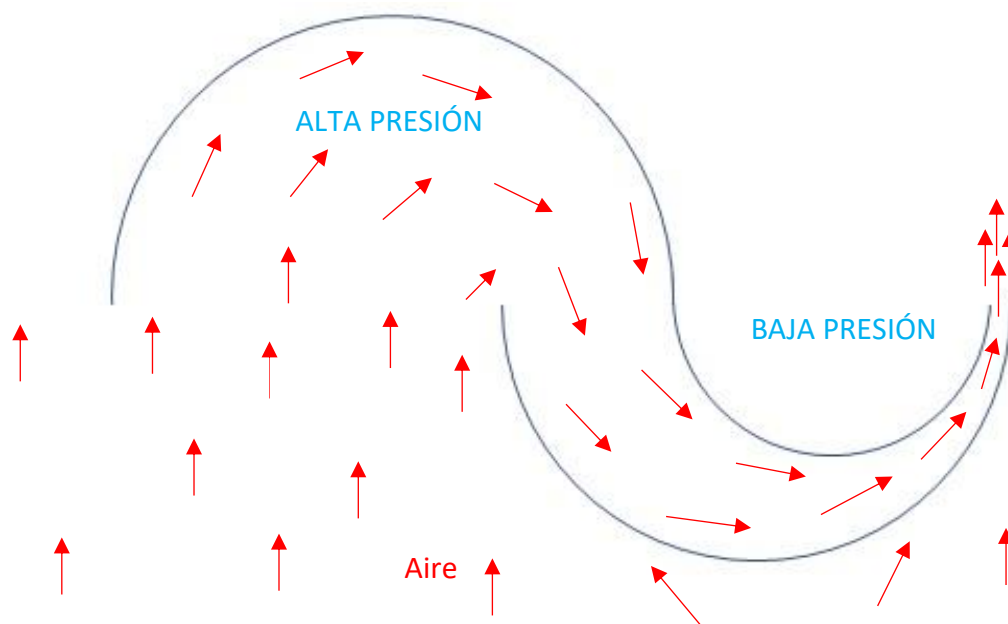
## 4.2 DISEÑO

Siguiendo el pliego de condiciones funcional, se ha desarrollado el diseño del aerogenerador VAWT. Es una máquina pensada para ser colocada en lugares urbanos o no muy alejados de zonas urbanizadas, por lo que todo su diseño se ha hecho acorde a este factor.

El diseño se ha dividido en dos apartados principales. Por un lado, valiéndose de los cálculos obtenidos con OpenFOAM y dibujando con SolidWorks, se ha diseñado el perfil de el rotor. Por otro lado, el resto de componentes estructurales han sido dibujados y analizados mediante SolidWorks y su función de análisis de tensiones.

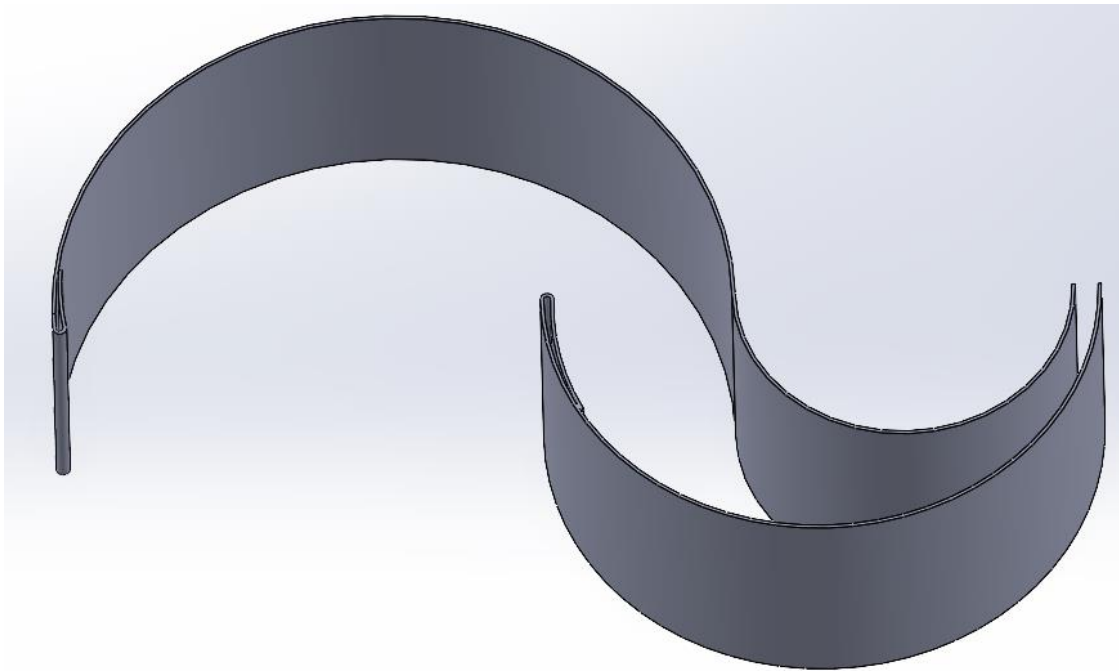
### 4.2.1 ROTOR

La idea de el perfil del rotor nace fruto de la búsqueda de un diseño que mejore las características aerodinámicas de el Savonius en forma de S. Con el objetivo de aprovechar la presión que se genera en la concavidad de las cazoletas, se ha desarrollado un diseño que mediante un conducto transporta el aire de la concavidad de alta presión a la de baja presión.



22. Fig. Funcionamiento perfil

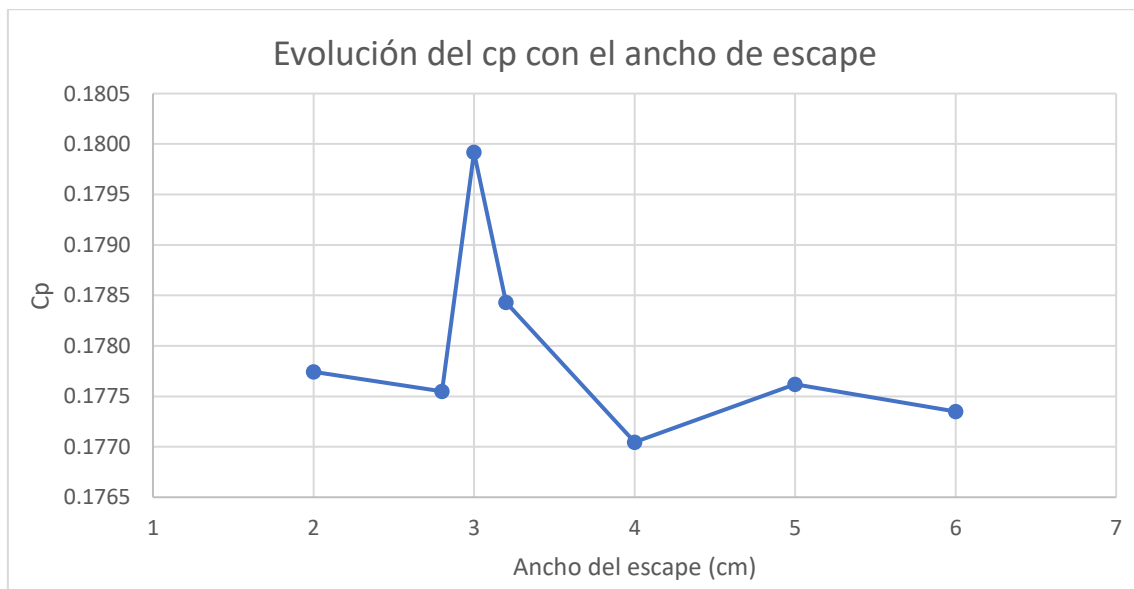
De esta forma se plantea la hipótesis de que la zona de baja presión dejará de tener tanta depresión y se reducirá el par negativo que se genera en esa cazoleta. Además el aire que salga por el escape de la sección saldrá a una velocidad considerable aplicando un impulso y generando un par favorable.



23. Fig. Sección del perfil

La geometría de este perfil puede variar de muchas formas, y con el fin de encontrar el diseño óptimo, se han planteado diferentes variantes y se ha calculado con OpenFOAM el par y potencia que generan cada una.

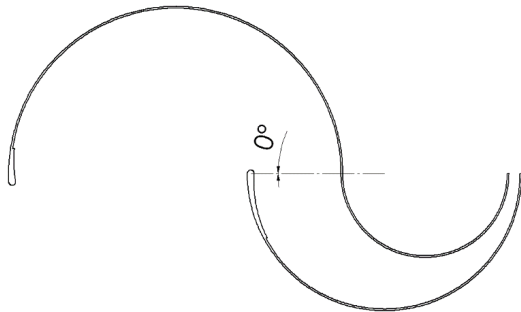
Primero se ha ido variando el ancho de la vía de escape del aire. Se ha variado desde 2 cm hasta 6 cm, y estos han sido los resultados obtenidos ( cálculos desarrollados en el apartado 4.3 ) :



24. Fig. Evolución del  $C_p$  con el ancho de escape

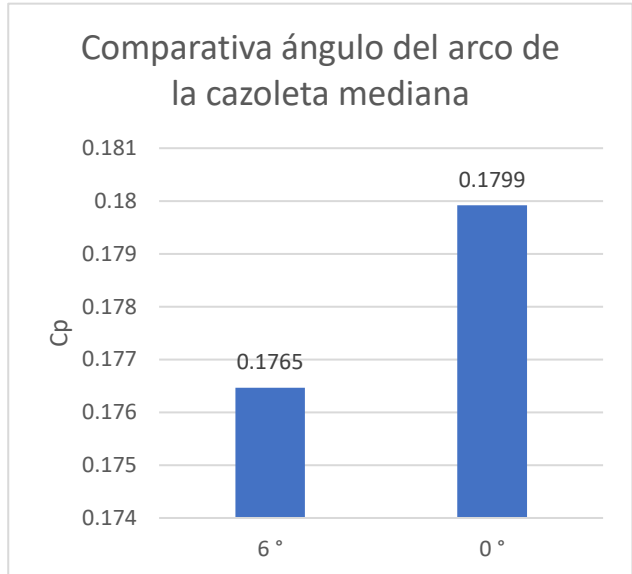
El ancho de 30 mm ha resultado ser la geometría que mayor potencia extrae.

Luego se ha probado a reducir el ángulo del arco de la cazoleta mediana. Los ángulos estudiados han sido  $180^\circ$ , es decir, una reducción de  $0^\circ$ , y  $174^\circ$ , es decir, una reducción de  $6^\circ$ . Estos han sido los resultados obtenidos ( cálculos desarrollados en el apartado 4.3 ) :

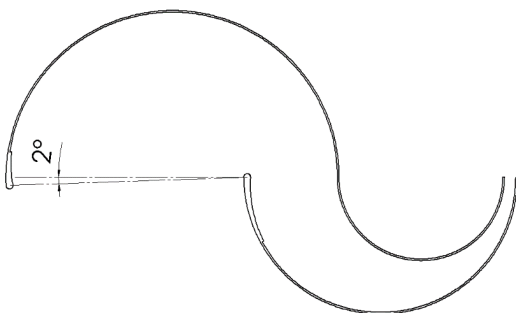


25. Fig. Ángulo del arco de la cazoleta mediana  $0^\circ$

El arco sin reducción de ángulo resulta ser el que mayor potencia extrae.

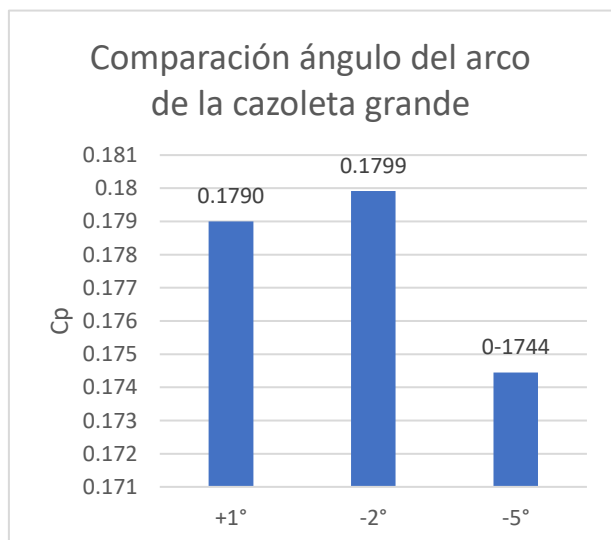


Por último, se ha estudiado la variación de el ángulo de el arco de la cazoleta grande. Las variantes analizadas han sido, una reducción de  $1^\circ$ , un aumento de  $2^\circ$  y un aumento de  $6^\circ$ . Estos han sido los resultados obtenidos ( cálculos desarrollados en el apartado 4.3 ) :



26. Fig. Ángulo del arco de la cazoleta grande  $2^\circ$

El arco con aumento de  $2^\circ$  es el que mayor potencia extrae.

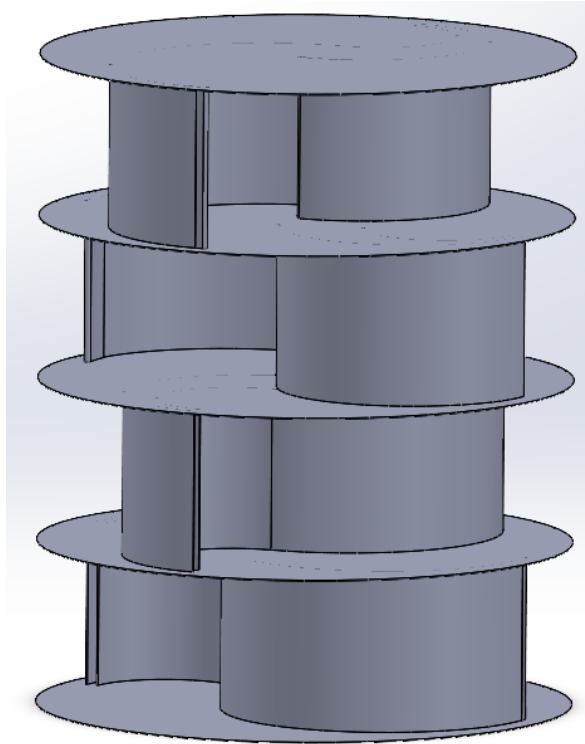


Una vez definida la sección del perfil se ha pasado a diseñar el conjunto total del rotor. Está demostrado [4] [5] [6] que colocar unos platos en los extremos de las palas es beneficioso para

Jon Cerrada Garcés

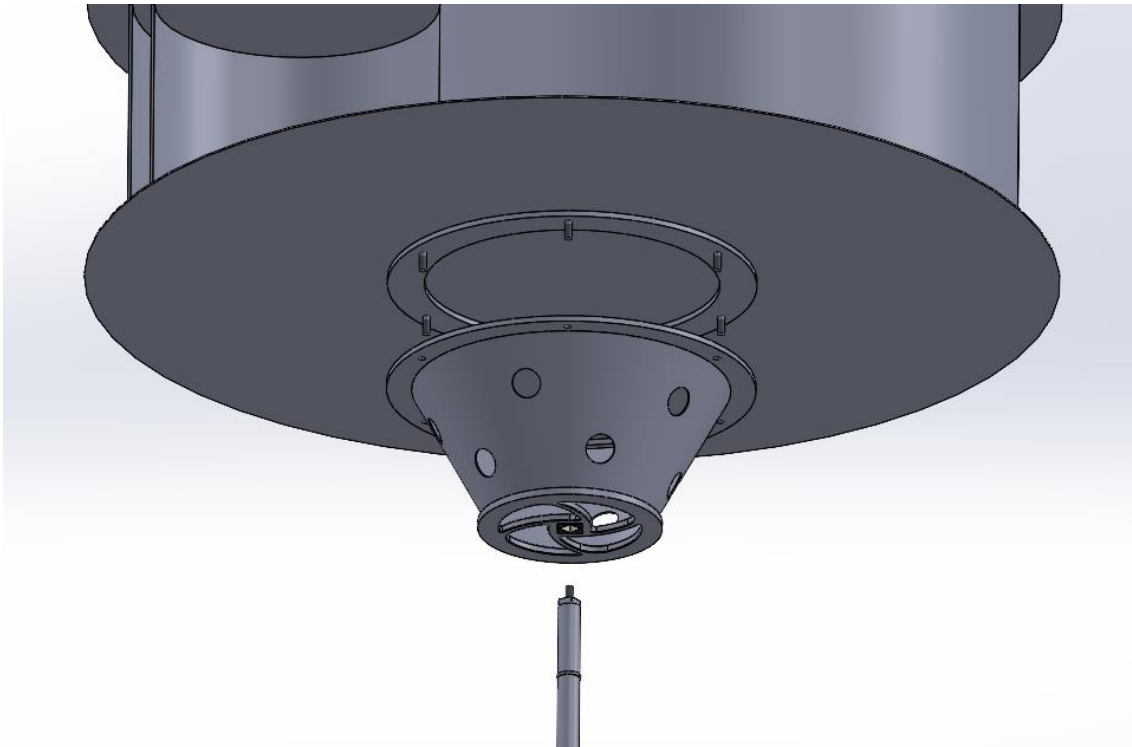
orientar mejor el viento y generar mas potencia. Por ello, se han colocado platos de 1.32 m al final y entre medio de cada etapa. En cuanto al número de etapas, si bien se puede observar que lo ideal son dos [4] [6] [7], debido a la asimetría de este perfil esto no es posible hacerlo. Para obtener un rotor equilibrado, con el centro de gravedad centrado y que no vibre, es necesario tener 4 etapas.

Para reducir el peso y el coste económico de el rotor, se ha optado por fabricarlo de laminas de aluminio. Su geometría sencilla hace posible fabricar mediante láminas soldadas toda la estructura.



27. Fig. Rotor

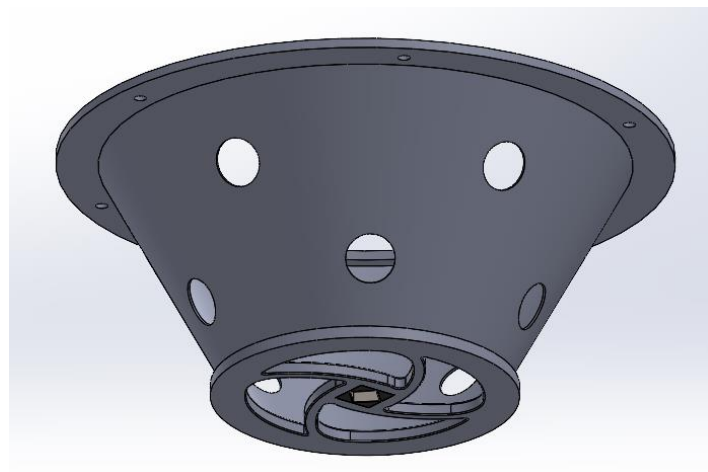
Por último, la geometría de este perfil imposibilita el hecho de tener un eje que atraviese el rotor. Esto, constructivamente hablando, supone problemas para sostener y conectar el rotor al eje de la multiplicadora. Para solucionar esto, se ha optado por soldar un anillo a el plato de la primera etapa, y ese anillo atornillarlo a una corona que será la encargada de transmitir el par a el eje de la multiplicadora.



28. Fig. Unión rotor - eje

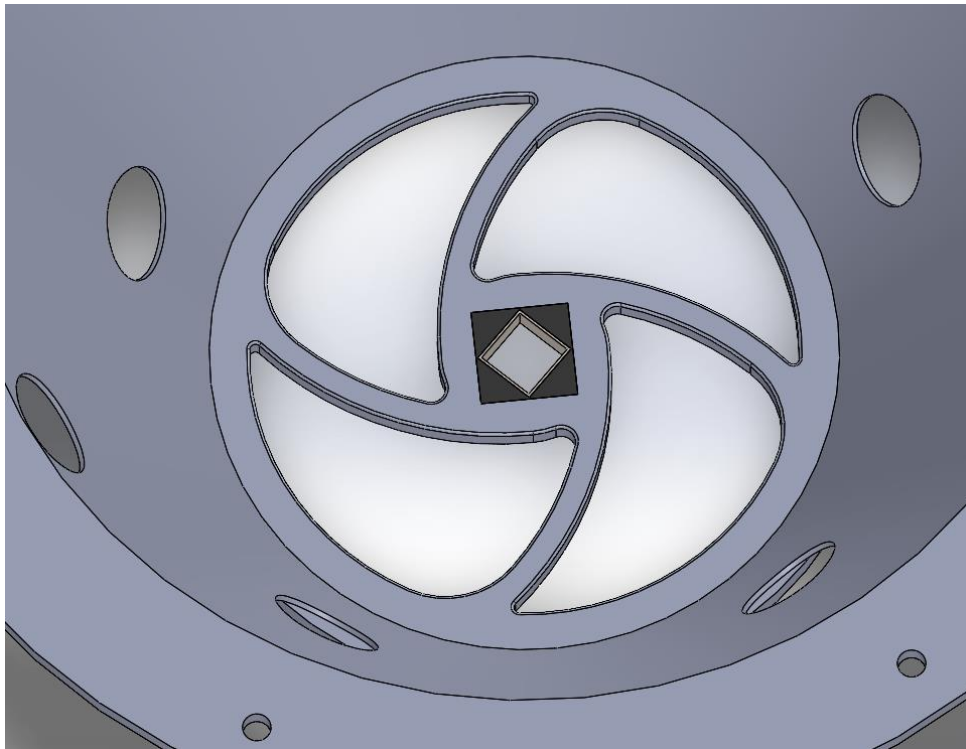
#### 4.2.2 COMPONENTES DEL AEROGENERADOR

Como ya se ha mencionado anteriormente, el elemento que une el rotor y el eje es una corona de doble anillo. El anillo superior, con un diámetro de 50 cm, se atornilla a el anillo que esta soldado al rotor. El disco/anillo inferior, con un diámetro de 25 cm, se apoya sobre la torre del aerogenerador y se encarga de transmitir el par de giro a el eje. Los anillos superior e inferior están unidos por una chapa cortada en forma cónica y perforada por una serie de agujeros que se encargan de aligerar la pieza y dejar que fluya aire hacia el exterior.



29. Fig. Corona

La unión de el disco inferior a el eje está hecha mediante una junta de caucho (ver figura 27). Esto se ha hecho para reducir las vibraciones transmitidas a el eje y evitar golpes de par bruscos.



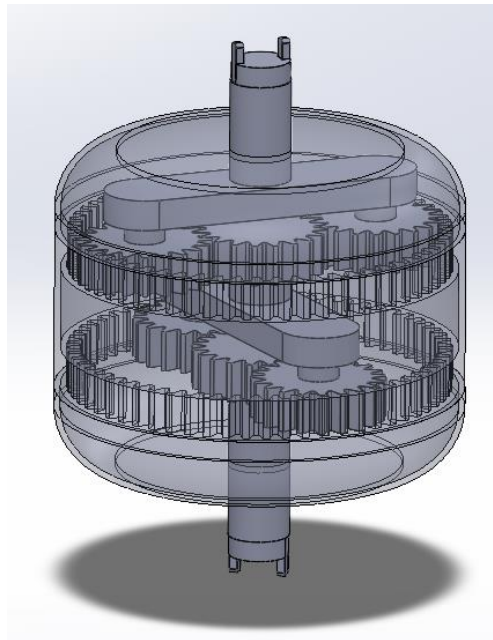
30. Fig. Disco inferior de la corona

El eje, encargado de transmitir la potencia, une el disco inferior de la corona con la multiplicadora y posteriormente la multiplicadora con el generador. Las uniones entre ejes están hechas con dos chavetas y una abrazadera. Todos los ejes tienen un diámetro de 3 cm.



31. Fig. Eje

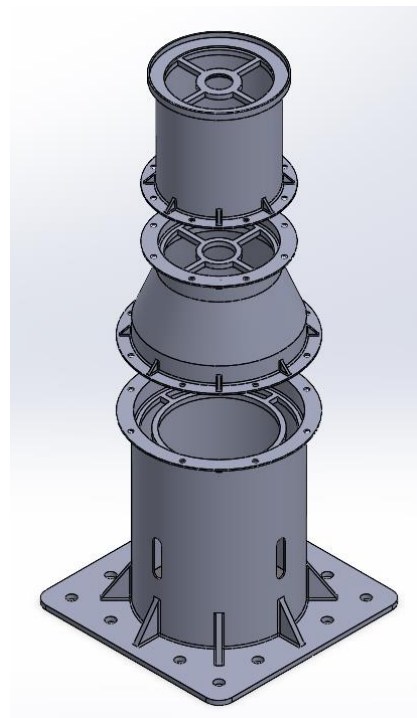
La multiplicadora se encarga de aumentar la velocidad angular por un factor de 16. Se trata de un sistema de engranajes planetario de dos etapas con una multiplicación de 4 por cada etapa. Están fabricados con un módulo de 3 mm y un piñón central de 20 dientes, dos satélites por etapa de 20 dientes y un porta satélites de 60 dientes. Cabe destacar que el dibujo de la multiplicadora es conceptual, ya que en un futuro avance del diseño, todo el conjunto del sistema de multiplicación sería adquirido del mercado.



32. Fig. Multiplicadora

El generador eléctrico tiene una potencia nominal de 1.2 kW, y al igual que la multiplicadora, su dibujo es conceptual, y en un futuro se buscará un generador en el mercado.

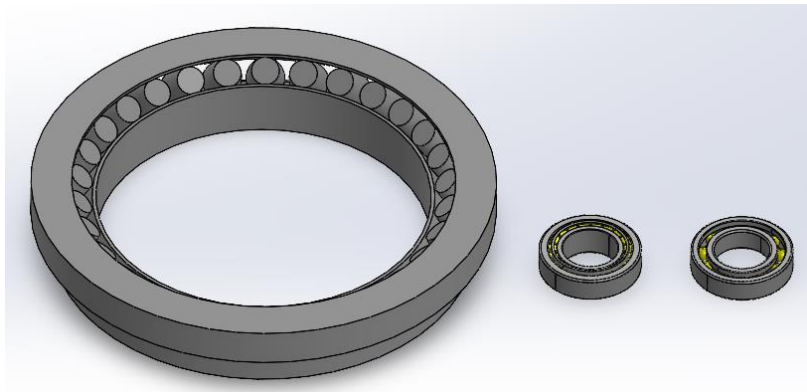
Todos estos elementos son sujetos y cubiertos por una torre o carcasa. La torre está fabricada en 3 etapas diferentes para facilitar el montaje del mecanismo. La primera etapa tiene un diámetro de 200 mm, la segunda es un cono que pasa de un diámetro de 200 mm a uno de 280 mm y la última tiene un diámetro de 280 mm. La etapa final va atornillada a el suelo o estructura de soporte, las etapas entre si se unen mediante una unión atornillada, y la etapa primera tiene apoyada sobre ella el peso de el rotor. Destacar que la etapa final tiene unas aberturas para que un flujo de aire pueda circular por dentro de la torre y se refrigeren los elementos del interior mediante convección natural.



33. Fig. Carcasa

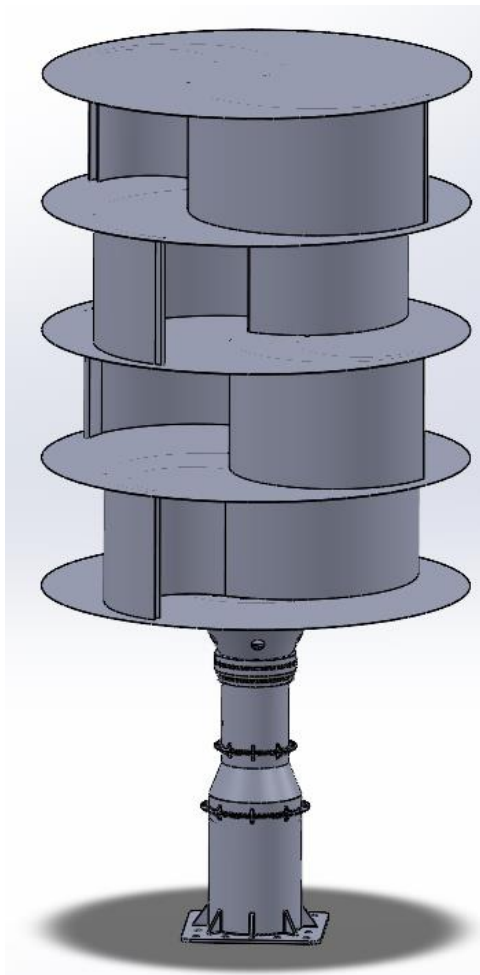
Para poder hacer girar todos los elementos móviles respecto a los fijos, se cuenta con una serie de rodamientos. Entre la carcasa y el rotor hay un rodamiento cónico con prioridad axial para permitir el giro del rotor a la vez que sujeta su peso. Para sujetar el eje se cuenta con un par de rodamientos, uno cónico y otro radial. El cónico se ocupa de restringir el movimiento vertical de el rotor a la vez que actúa como reacción para que no vuelque el sistema. El radial actúa también como reacción antivuelco y se sitúa lo más separado posible al cónico. Destacar que en la multiplicadora habrá rodamientos también, pero no son dibujados en este diseño.





34. Fig. Rodamientos

El diseño de estas piezas esta hecho con el objetivo de tener un coste de fabricación reducido. Los bajos rendimientos de estas máquinas hace que para que resulten rentables tengan que tener un proceso de fabricación y montaje sencillo.



35. Fig. Aerogenerador con el nuevo diseño de palas

## 4.3 CÁLCULOS

### 4.3.1 CFD (ROTOR)

Para realizar los cálculos CFD sobre el rotor se ha utilizado el programa OpenFOAM. Se ha planteado un problema en 2D con la sección de las palas del rotor, y se han realizado una serie de simulaciones dinámicas.

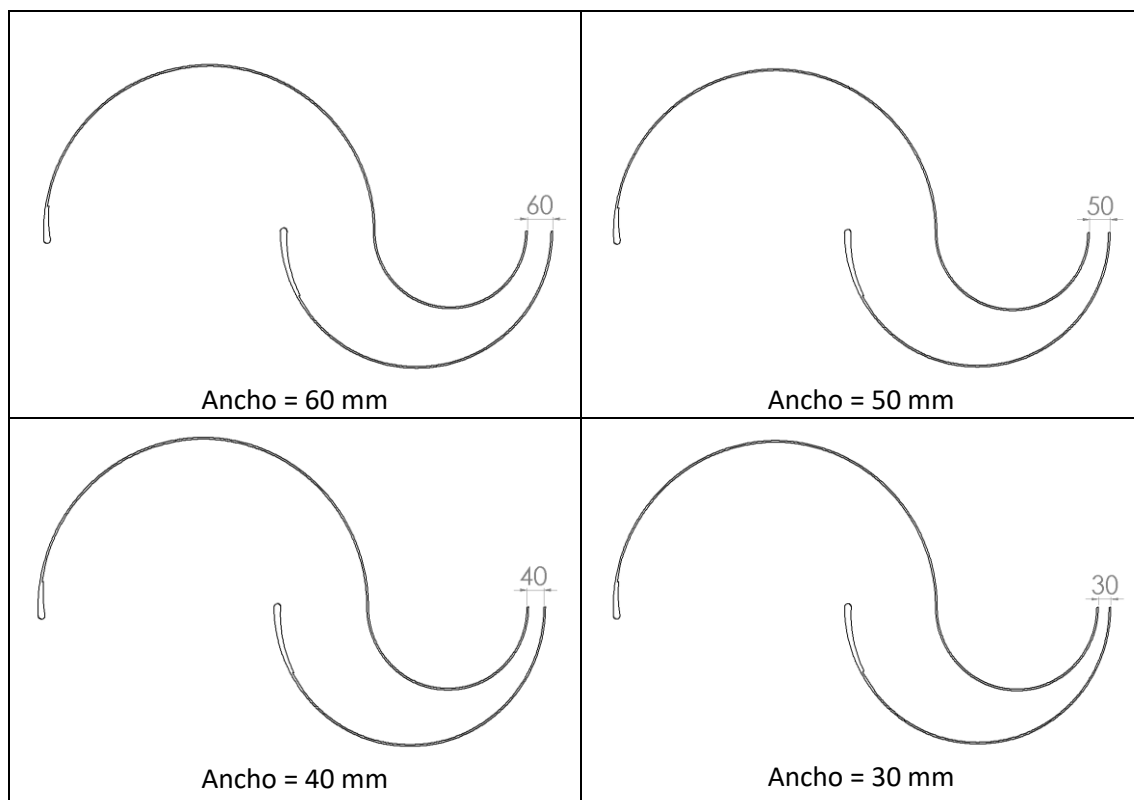
#### 4.3.1.1 PLANTEAMIENTO

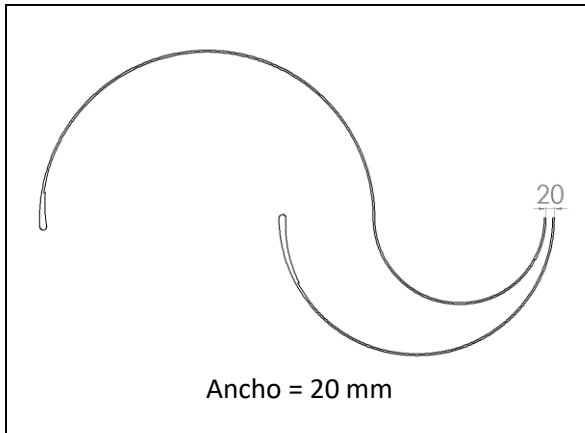
##### PERFIL

Para encontrar el diseño de perfil óptimo se puede estudiar el efecto de muchísimas variables geométricas, pero esto sería excesivamente laborioso. A continuación se estudia la influencia de tres variables geométricas: La anchura de la vía de escape del aire, el ángulo del arco de la cazoleta mediana, y el ángulo del arco de la cazoleta grande.

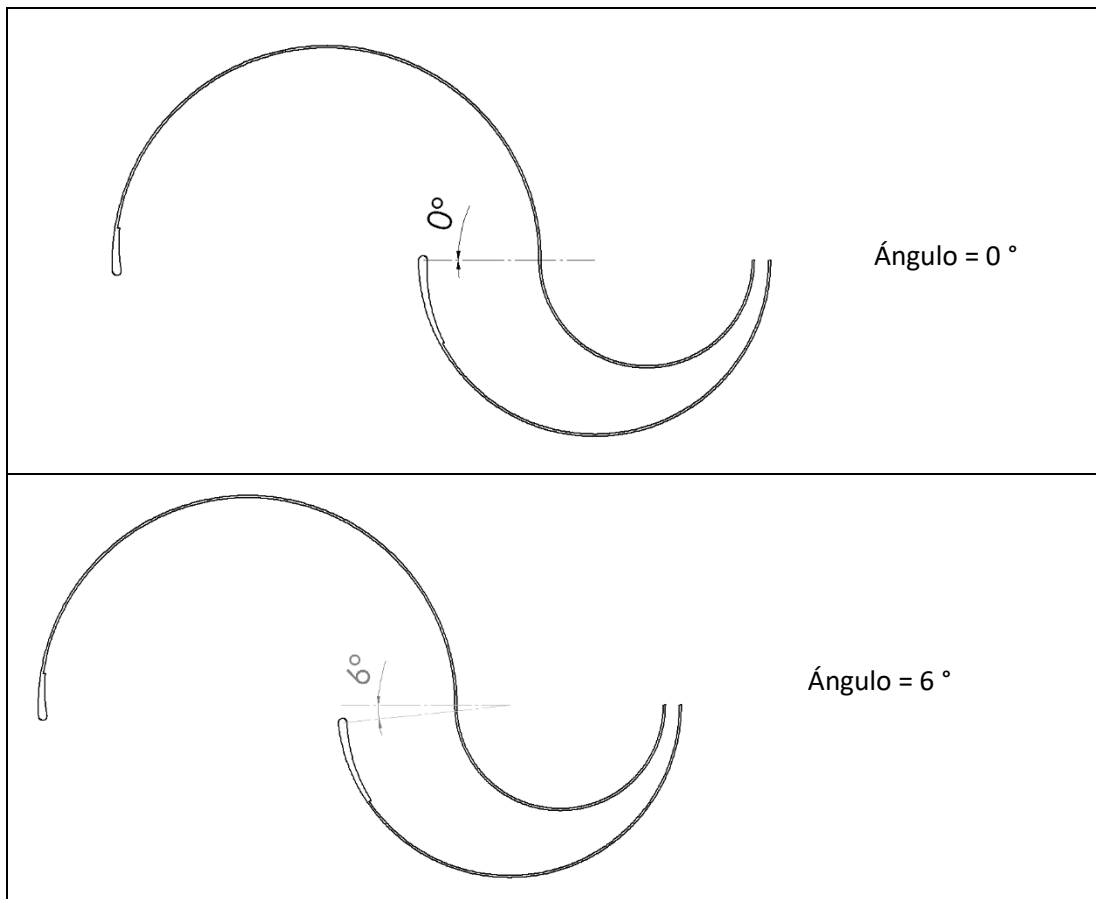
- **Anchura de la vía de escape del aire**

Se realizan los cálculos para los siguientes perfiles:

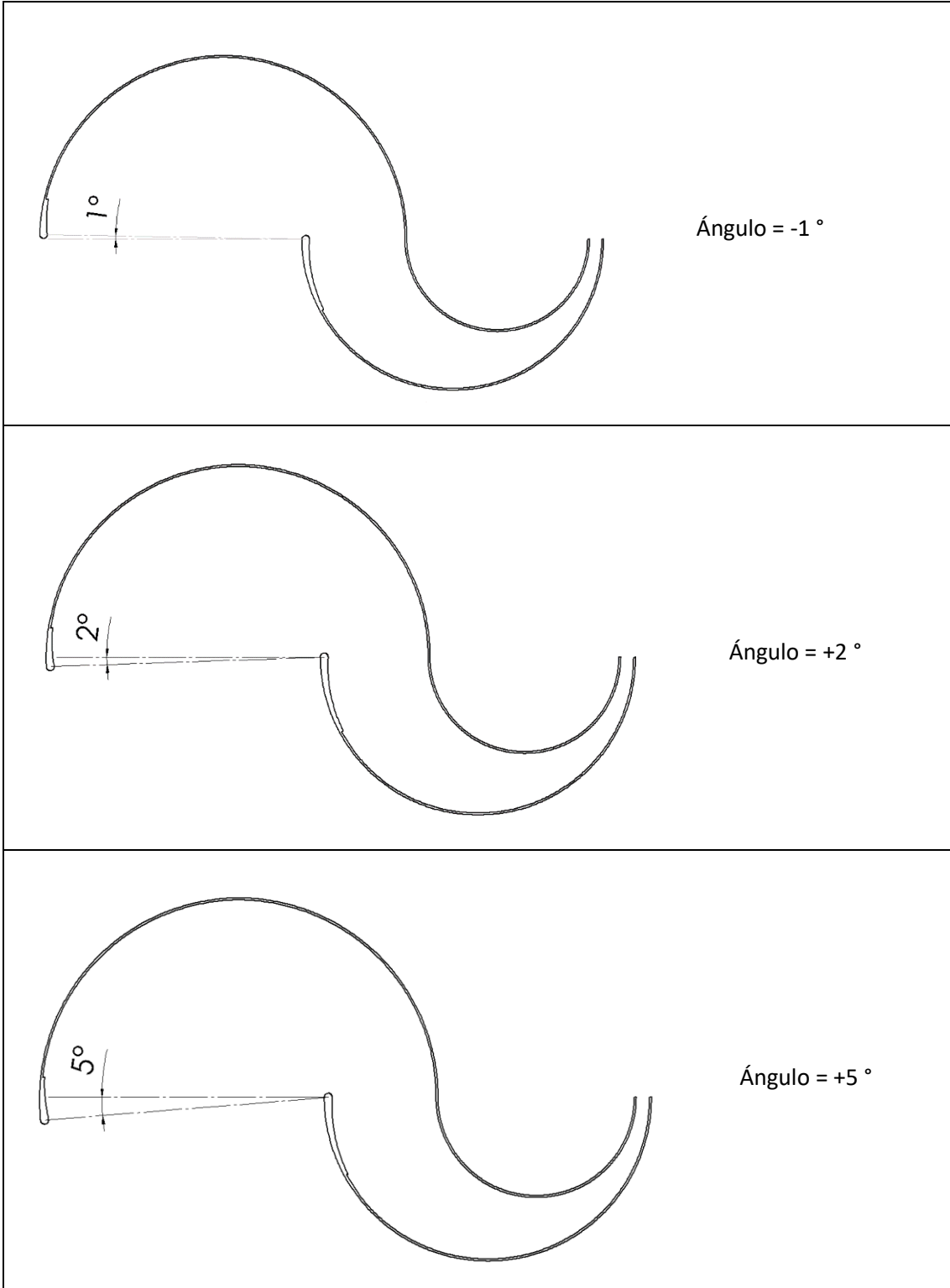




- **Ángulo del arco de la cazoleta mediana**  
Se realizan los cálculos para los siguientes perfiles:



- **Ángulo del arco de la cazoleta grande**  
Se realizan los cálculos para los siguientes perfiles:



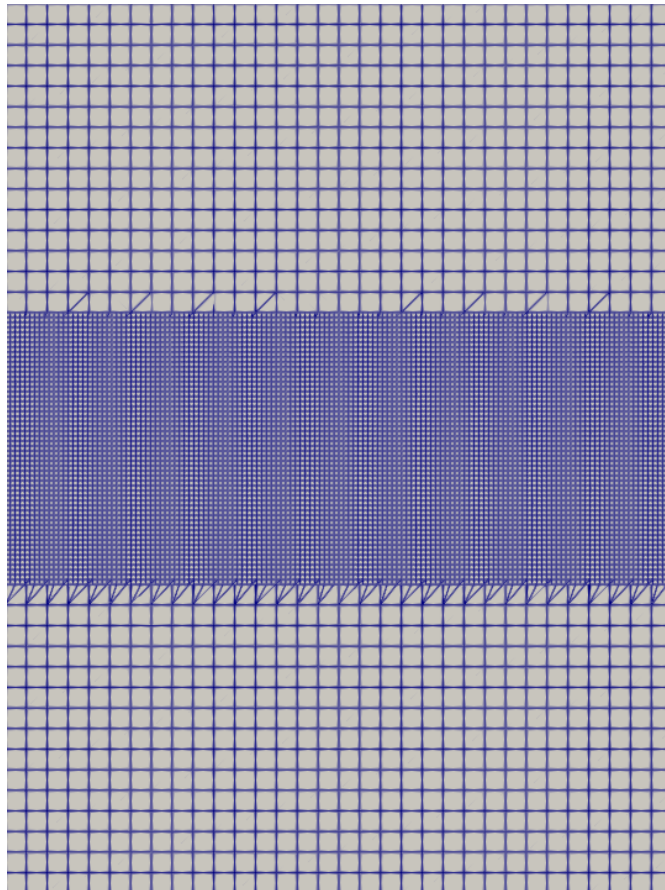
## MALLADO

La malla 2D se ha construido mediante *'blockMesh'* y *'snappyHexMesh'*.

- ***'blockMesh'***

Se ha mallado el bloque de fondo con unas magnitudes de 6.5m x 8.6m y con el siguiente refinamiento:

```
blocks
(
  hex (0 1 2 3 4 5 6 7) (32 15 1) simpleGrading (1 1 1) //Block1
  hex (8 9 10 11 12 13 14 15) (138 55 1) simpleGrading (1 1 1) //Block2
  hex (16 17 18 19 20 21 22 23) (32 15 1) simpleGrading (1 1 1) //Block3
);
```



36. Fig. Mallado con *blockMesh*

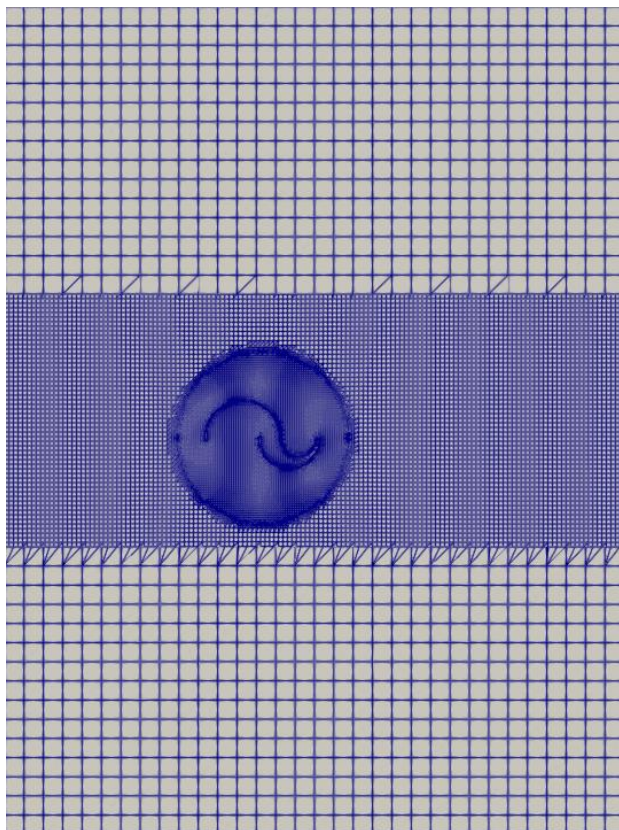
- ***'snappyHexMesh'***

Se ha introducido la geometría de estudio y una AMI para generar la malla dinámica.

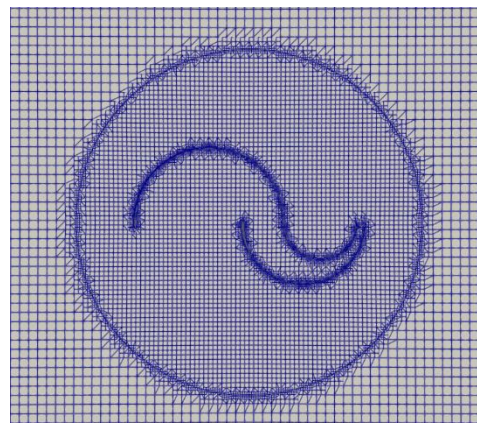
```

refinementSurfaces
{
  VAWT
  {
    level (3 3);
    patchInfo
    {
      type wall;
    }
  }
  AMI
  {
    level (2 2);
    patchInfo { type wall; }
    faceZone innerAMI;
    cellZone innerAMI;
    faceType boundary;
    cellZoneInside inside;
  }
}
resolveFeatureAngle 54;

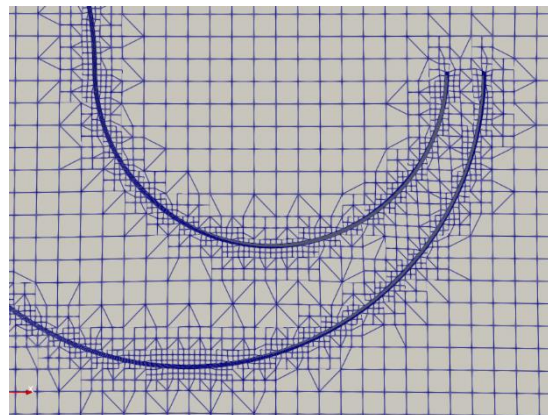
```



a) Mallado del espacio de trabajo



b) Mallado del rotor



c) Mallado superficie rotor

37. Fig. Mallado creado con snappyHexMesh

Para generar la malla dinámica se ha utilizado *'dynamicMesh'*. La masa y la inercia de la pieza se han extraído de SolidWorks. Cabe destacar que tanto la masa como la inercia son las de el segmento de la sección de 5cm de altura. Esto se debe a que se está trabajando con una simulación 2D.

```
dynamicFvMesh    dynamicMotionSolverFvMesh;
motionSolverLibs ("libsixDoFRigidBodyMotion.so");
solver          sixDoFRigidBodyMotion;
sixDoFRigidBodyMotionCoeffs
{
    patches      (VAWT);
    innerDistance 1.2;
    outerDistance 1.3;
    rho          rhoInf;
    rhoInf       1.2;
    mass         1.843;
    momentOfInertia (0.0865 0.241 0.327);
    centreOfMass (0 0 0.025);
    centreOfRotation (0 0 0.025);
    orientation
    (
        1 0 0
        0 1 0
        0 0 1
    );
};
```

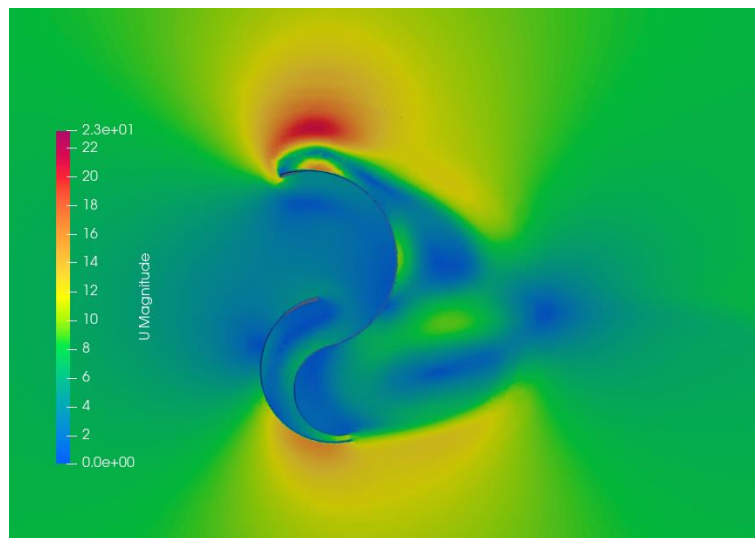
## CONDICIONES DE CONTORNO

Las condiciones para el modelo de turbulencias  $k-\omega$  SST son:

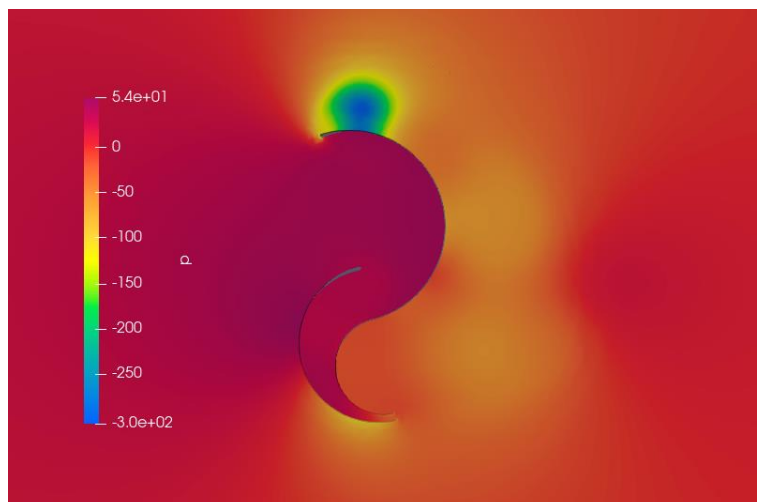
Variable	Perfil	Plano lateral 2D	Unidades
U	type fixedValue; value uniform (8 0 0);	type empty;	[m/s]
p	type zeroGradient;	type empty;	[N/m <sup>2</sup> ]
k	type turbulentIntensityKineticEnergyInlet; intensity 0.06; value uniform 0.01;	type empty;	[m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]
$\omega$	type turbulentMixingLengthFrequencyInlet; value \$internalField;	type empty;	[1/s]

#### 4.3.1.2 RESULTADOS

Se han realizado simulaciones de 8 segundos de los perfiles mencionados anteriormente, y se les ha hecho un *'postProcessing'* para poder extraer el par generado y la velocidad adquirida. Teniendo el par y la velocidad se ha sacado la potencia y con ello el  $C_p$ . Los valores que se han cogido por buenos han sido los de el último ciclo de simulación, ya que se observa que para ese momento la velocidad de giro se estabiliza y se deja de estar en un régimen transitorio.



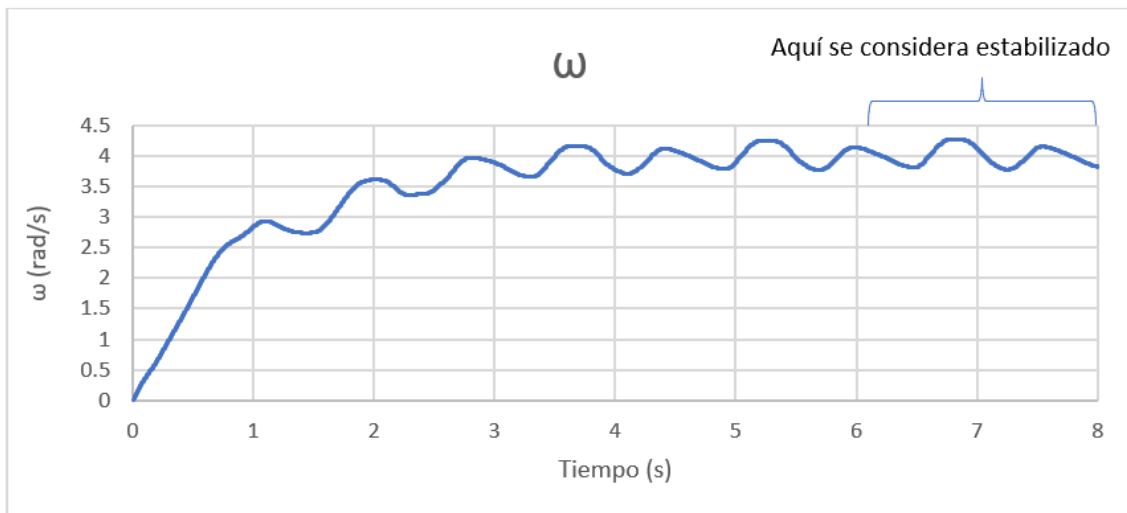
a) Visualización de la velocidad (U) en la simulación



b) Visualización de la presión (p) en la simulación

38. Fig. Visualización de la simulación

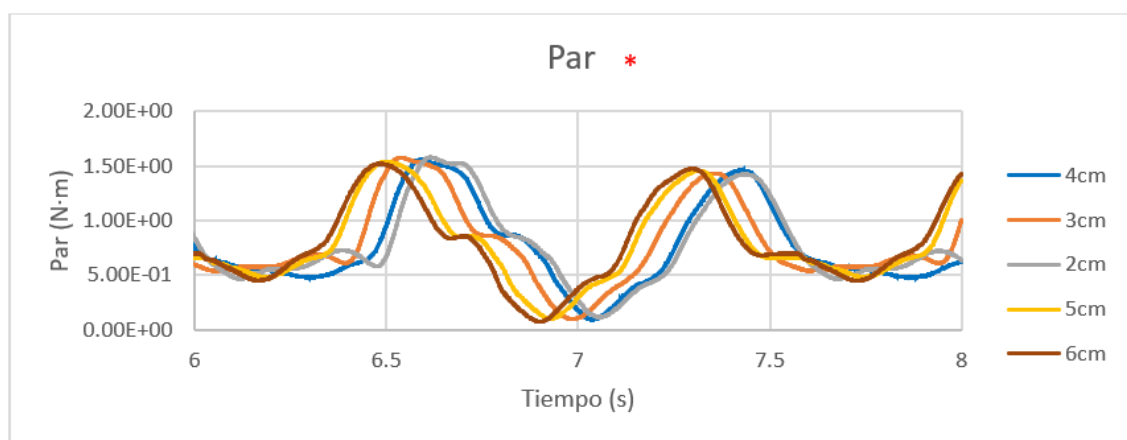
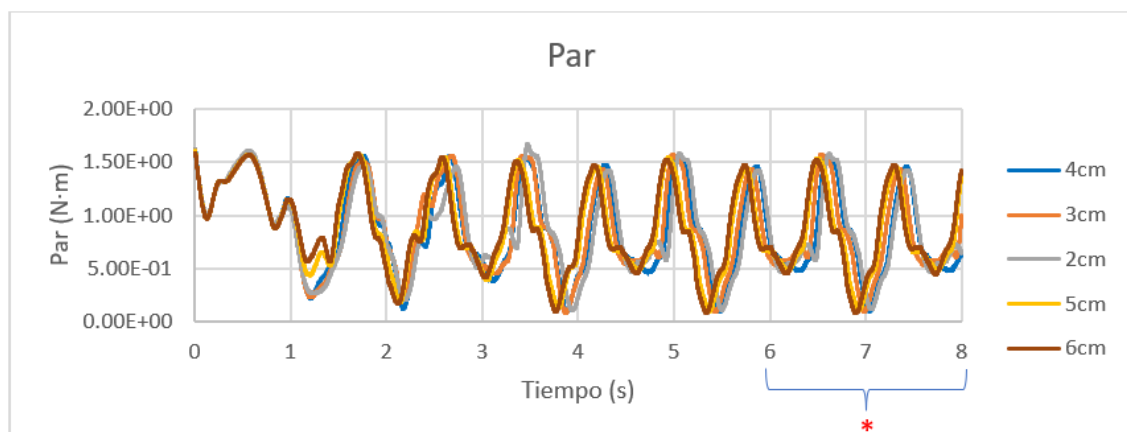




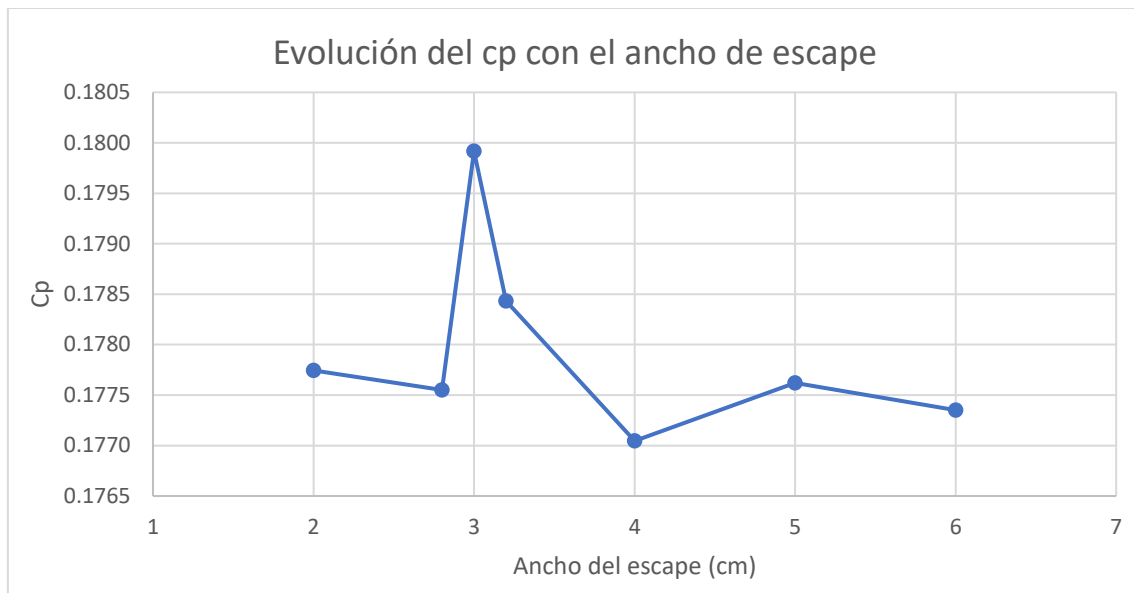
39. Fig. Evolución de la velocidad angular ( $\omega$ ) en la simulación

A continuación se muestran los resultados para las tres variables geométricas estudiadas:

- **Anchura de la vía de escape del aire**



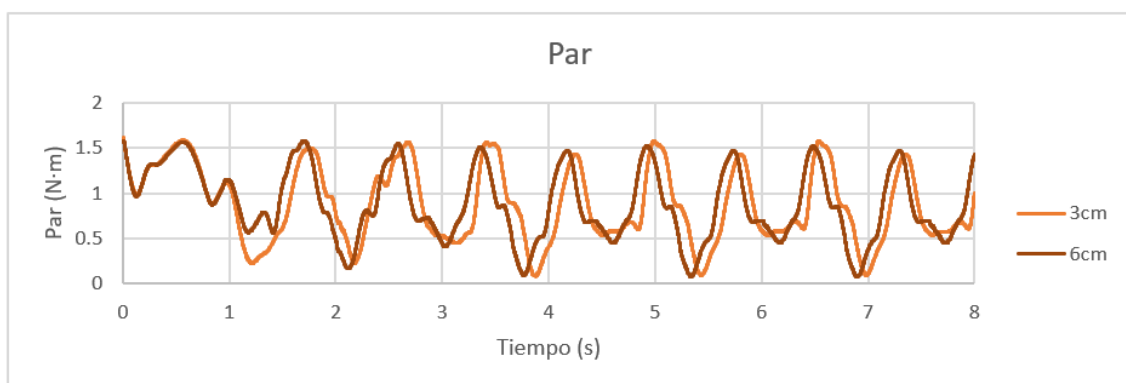
40. Fig. Evolución del par generador a los largo de las simulaciones



41. Fig. Evolución del  $C_p$  con el ancho de escape

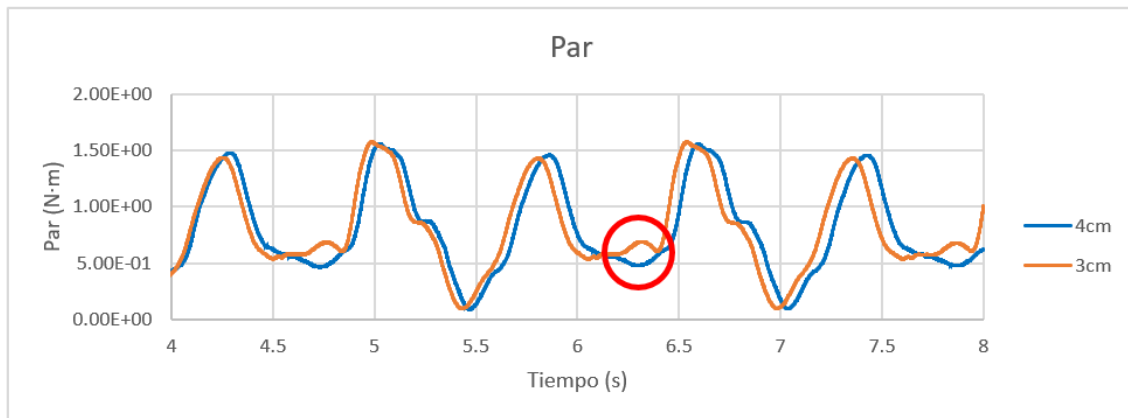
Los resultados muestran que el ancho de 3 cm es el que mayor potencia extrae.

#### Análisis de resultados



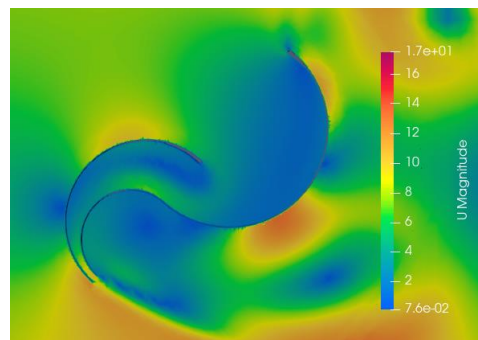
42. Fig. Comparación del par de los perfiles de 3 cm y 6 cm

Puede verse que cuanto más ancho es el escape, más par de arranque hay y antes empieza a girar. Sin embargo, una vez alcanzan velocidad, el ancho de 3 cm se comporta mejor, y genera mayor par. Nótese que si la simulación hubiese sido más larga, la gráfica de 3 cm hubiese alcanzado a la de 6 cm.



43. Fig. Comparación del par de los perfiles de 3 cm y 4 cm

En esta gráfica se observa bien la mejora que supone pasar de un ancho de 4 cm a uno de 3 cm. Cuando el perfil está en la posición que se muestra en la figura 41, el ancho de 3 cm genera un par notablemente superior.



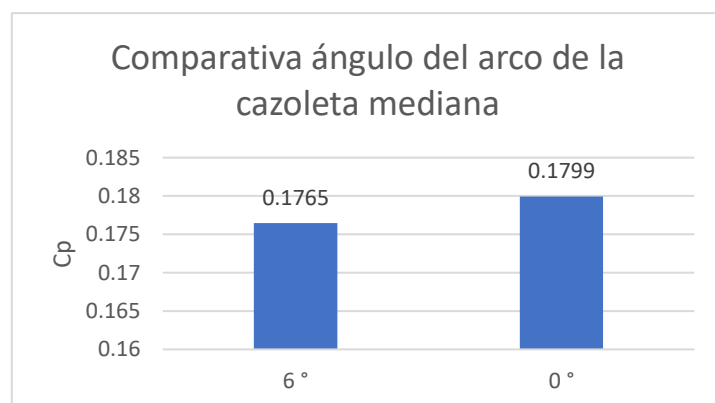
44. Fig. Posición del rotor 1

- **Ángulo del arco de la cazoleta mediana**



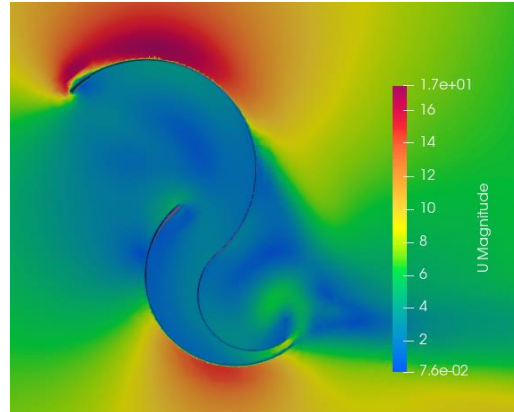
45. Fig. Comparación del par de los perfiles de 0° y 6°

Los resultados muestran que el ángulo de 0° es el que mayor potencia extrae.



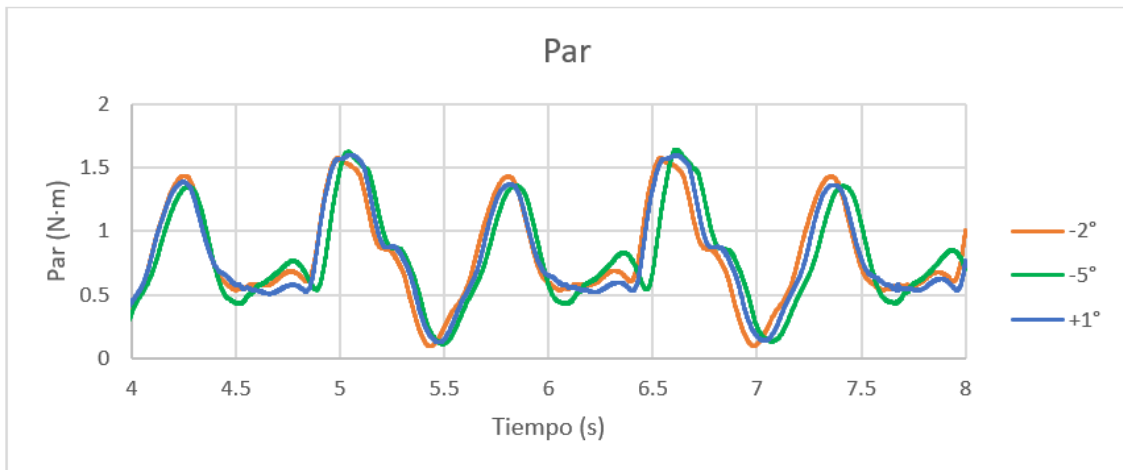
**Análisis de resultados**

Se observa que al reducir el arco, los picos de par que se dan cuando el rotor está en la posición de la figura 43 son más bajos, haciendo que el  $C_p$  sea también menor.



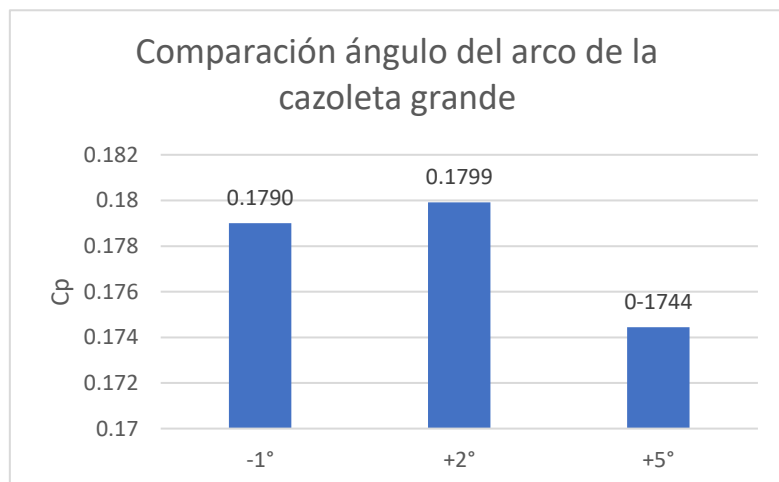
46. Fig. Posición del rotor 2

- **Ángulo del arco de la cazoleta grande**



47. Fig. Comparación par variando la cazoleta grande

Los resultados muestran que el ángulo de  $-2^\circ$  es el que mayor potencia extrae.



48. Fig. Comparación del ángulo del arco de la cazoleta grande

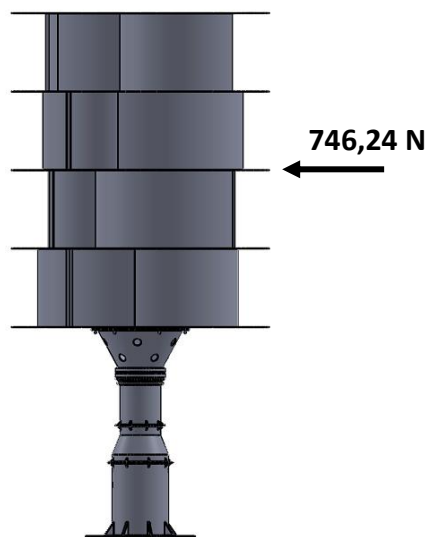
#### 4.3.2 ANALISIS DE TENSIONES (COMPONENTES DEL AEROGENERADOR)

Para realizar el análisis de tensiones de los componentes se ha utilizado el programa SolidWorks. Este trabajo está realizando con el SolidWorks de licencia educativa, y esto hace que el programa tenga ciertas limitaciones. Una de ellas está en el módulo de cálculo de tensiones exprés (SimulationXpress). Por un lado, las sujeciones son perfectamente rígidas y restringen el movimiento en todas las direcciones. Esto hace que las uniones apoyadas no sean del todo realistas, ya que en la realidad serán uniones que no restrinjan el movimiento en todos los ejes. Por otro lado, no se permite la introducción de momentos. Esto supone un problema considerable, y se a solucionado de la siguiente manera:

- Los momentos sobre el eje vertical, eje z, se consiguen aplicando dos fuerzas iguales y opuestas a una misma distancia de el eje.
- Los momentos sobre los ejes x e y, no se consideran. Esto si el aerogenerador tuviese una altura mucho mayor no sería una hipótesis tolerable, pero en este caso al haber entorno a metro y medio entre el punto de aplicación de la fuerza transversal y la sujeción, no se consideran. Sabiendo el error que se esta cometiendo con este cálculo, se trata de obtener unos coeficientes de seguridad holgados.

Las cargas que soporta el aerogenerador son:

- Las fuerzas que el aerogenerador va a soportar debido a la resistencia del viento se han obtenido mediante un post-processing de la simulación CFD con el programa Paraview. Sale un valor total de 746,24 N aplicados en el centro de la sección perpendicular al viento de el rotor.



49. Fig. Aplicación de fuerza transversal del viento

- El par que genera el viento, y por tanto, al que está sometido el aerogenerador se extrae de los resultados obtenidos de OpenFOAM. Se ve que el par máximo se da en el primer instante de la simulación, es decir, al arrancar, y este tiene un valor aproximado de 48 N·m por etapa, es decir, 192 N·m en total. Como se ha mencionado anteriormente, para

conseguir dicho par se aplican dos fuerzas iguales y opuestas a una misma distancia de el eje. En este caso a una distancia de  $\frac{0.45}{2} m$ .

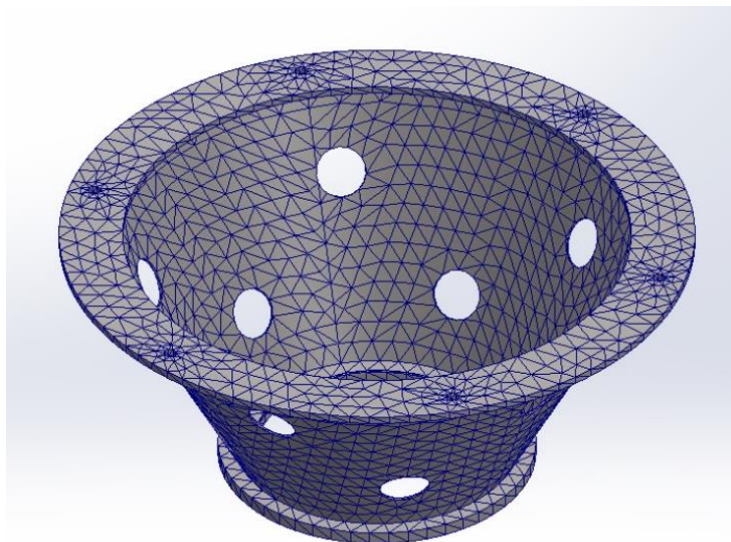
$$F = \frac{192 N \cdot m}{D} = \frac{192 N \cdot m}{0.45 m} = 426,7 N$$

- Por último, la estructura soporta el peso de los componentes. Los más pesados son el rotor, con 70 Kg y la corona con 8.47 Kg.

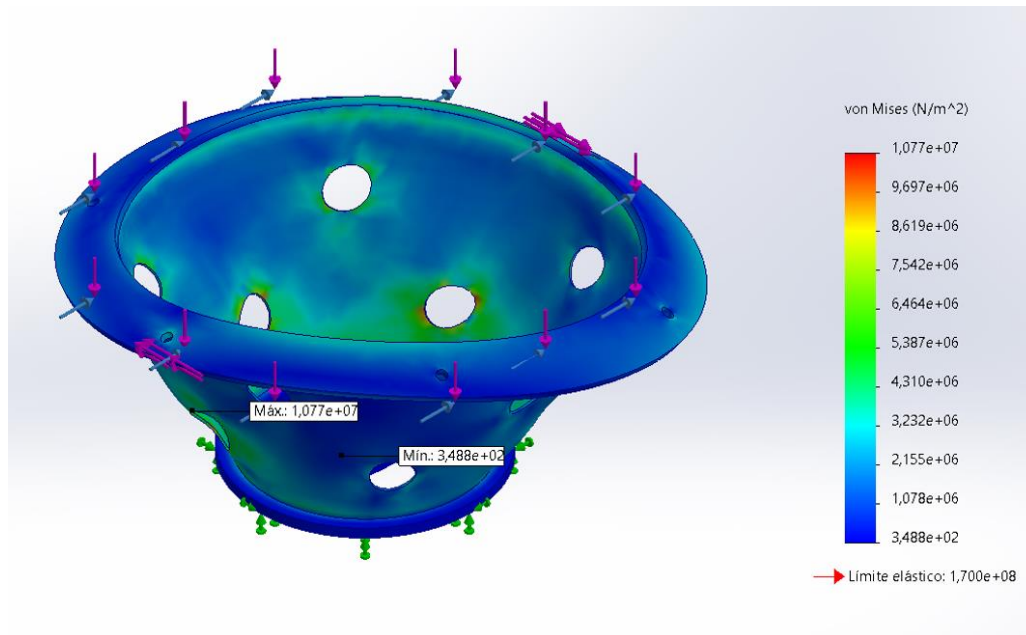
En cuanto a los componentes a analizar, solo los que estructuralmente mas carga reciben se muestran a continuación.

Uno de ellos es la corona que une el rotor y la torre, y para su estudio se han realizado dos hipótesis. Una de ellas es considerando que el viento hace una fuerza vertical hacia abajo (Hipótesis 1) de 30Kg (lo que sumado a los 70 Kg del peso del rotor son 100 Kg), y la otra es suponiendo justamente lo contrario, que el viento hace una fuerza vertical hacia arriba (Hipótesis 2) de 30 Kg (teniendo en cuenta que el rotor peso 70 Kg en realidad el viento estaría haciendo 100 Kg de fuerza vertical ascendente). Cabe destacar que debido a las limitaciones del SimulationXpress de versión estudiantil en la hipótesis 1 el par absorbido por el exterior del anillo inferior (y no con el interior como realmente debería de ser), y que en la hipótesis 2 el cortante no es considerado para evitar obtener unos resultados falsos.

#### CORONA - HIPÓTESIS 1



50. Fig. Mallado corona hipótesis 1



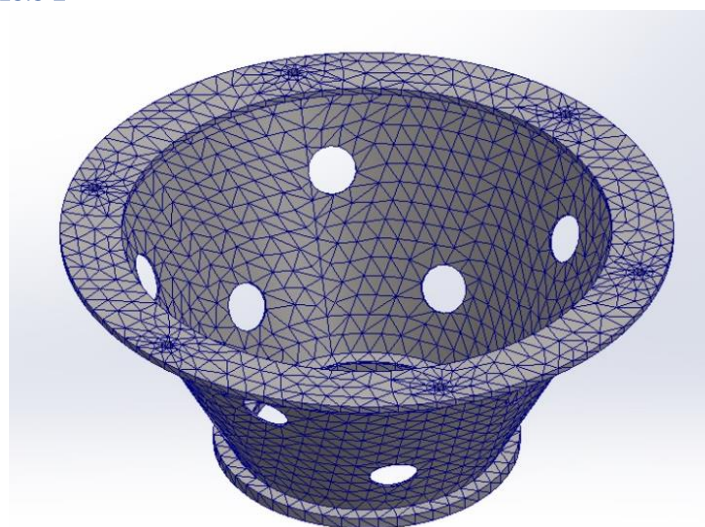
51. Fig. Tensiones de von Mises corona hipótesis 1

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Stress	VON: Tensión de von Mises	3,488e+02N/m <sup>2</sup> Nodo: 3024	1,077e+07N/m <sup>2</sup> Nodo: 19414
Displacement	URES: Desplazamientos resultantes	0,000e+00mm Nodo: 1	2,490e-02mm Nodo: 9961
Factor of Safety	Tensión de von Mises máx.	1,578e+01 Nodo: 19414	4,874e+05 Nodo: 3024

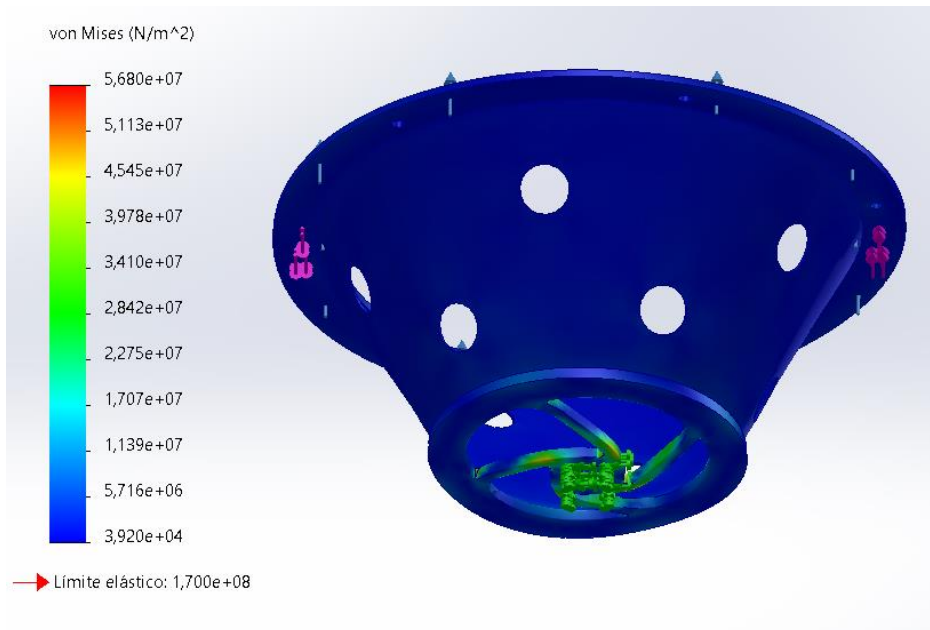
**Conclusiones:**

Las mayores tensiones se dan en la chapa y se obtiene un **coeficiente de seguridad de 15.78**. Este es suficientemente elevado para asegurarnos de que la pieza no fallará (tampoco a fatiga).

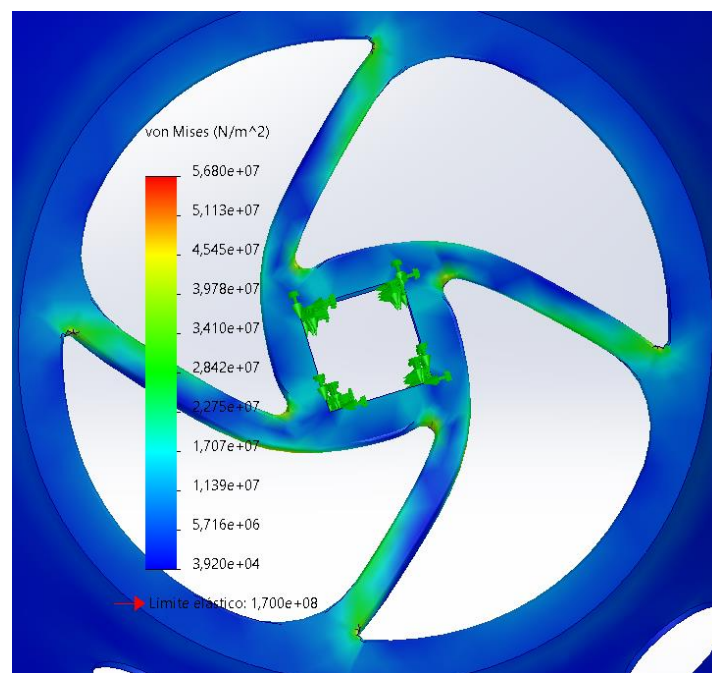
**CORONA - HIPÓTESIS 2**



52. Fig. Mallado corona hipótesis 2



53. Fig. Tensiones de von Mises corona hipótesis 2



54. Fig. Tensiones de von Mises disco inferior

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Stress	VON: Tensión de von Mises	3,920e+04N/m <sup>2</sup> Nodo: 9463	5,680e+07N/m <sup>2</sup> Nodo: 243
Displacement	URES: Desplazamientos resultantes	0,000e+00mm Nodo: 2937	1,032e-01mm Nodo: 10432
Factor of Safety	Tensión de von Mises máx.	<b>2,993e+00</b> Nodo: 243	4,337e+03 Nodo: 9463

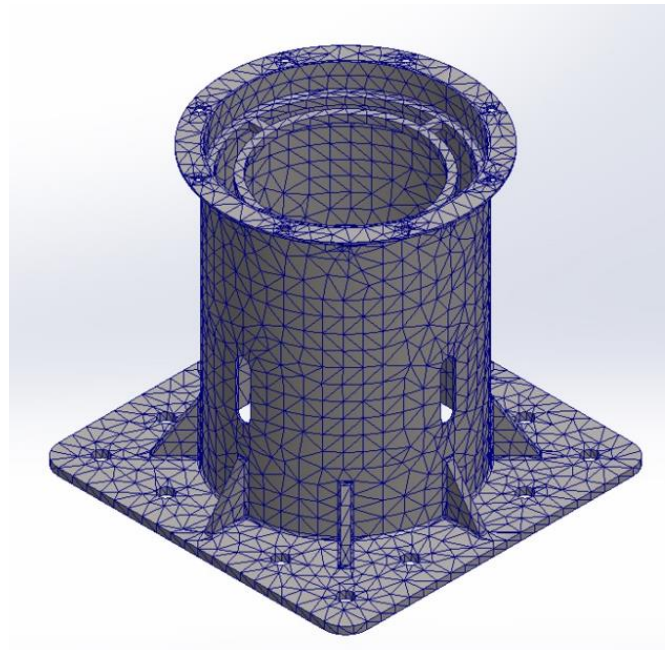
**Conclusiones:**

Las mayores tensiones se dan en el disco inferior y se obtiene un **coeficiente de seguridad de 3**. Este es suficientemente elevado para asegurarnos de que la pieza no fallará (tampoco a fatiga).

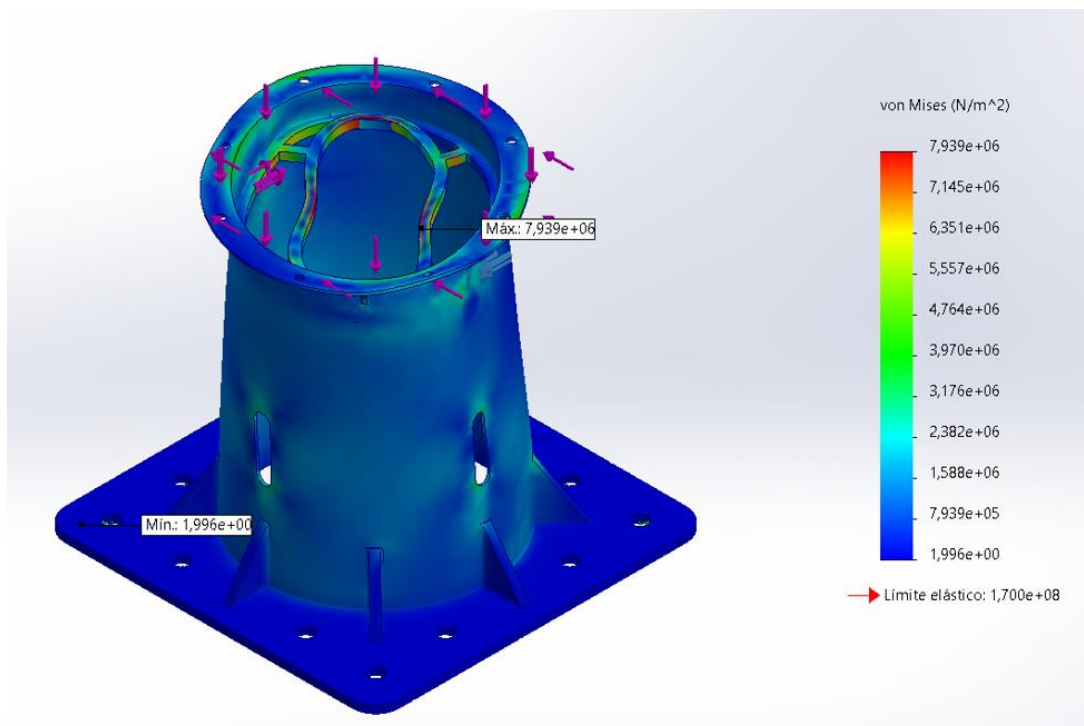


El segundo elemento a estudiar es la carcasa, y en concreto, la sección inferior de la carcasa. Se hace únicamente de este segmento ya que es el que mayor esbeltez tiene, y por tanto, el que mas tensión sufrirá.

### CARCASA



55. Fig. Mallado carcasa

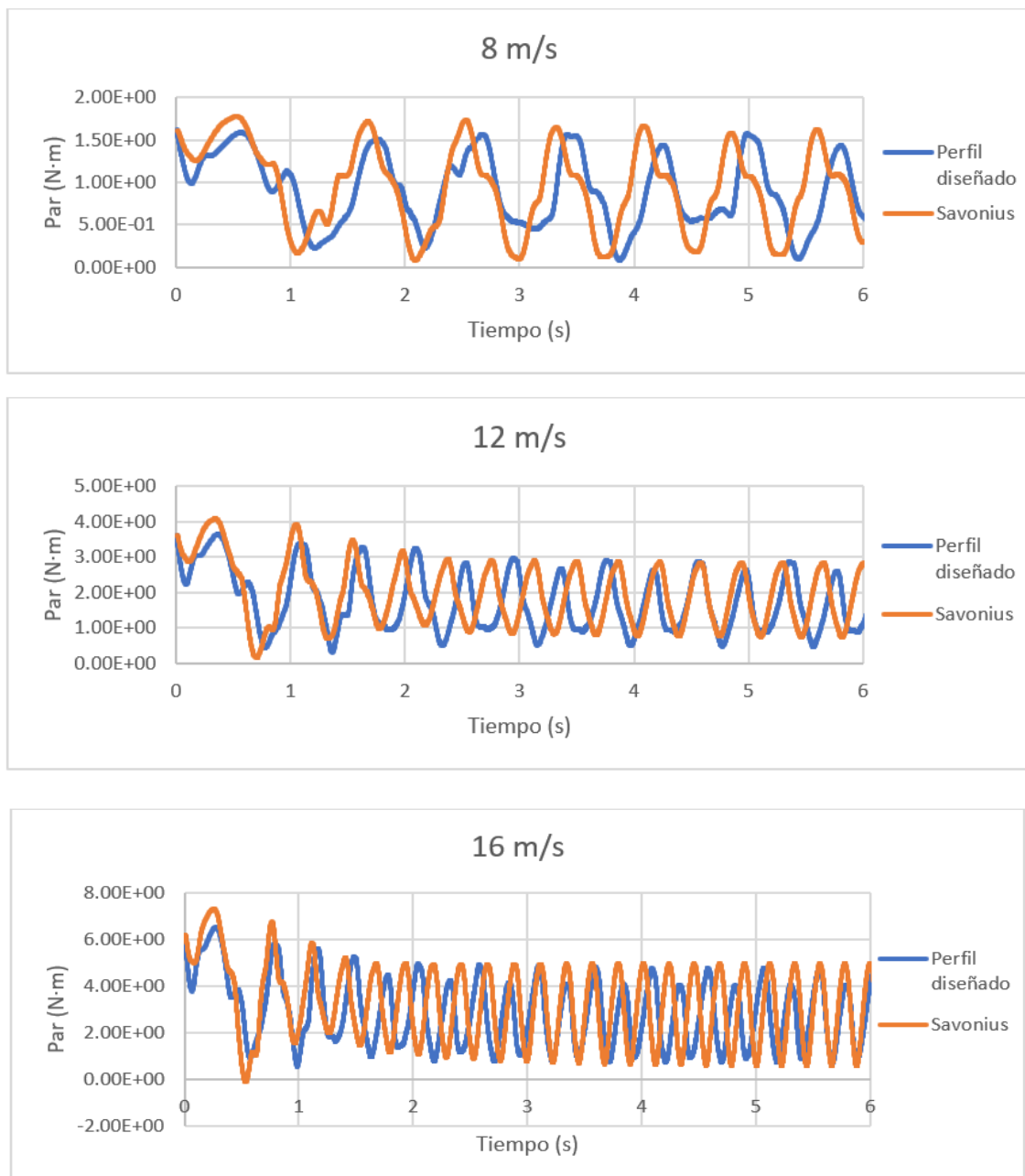


56. Fig. Tensiones de von Mises carcasa

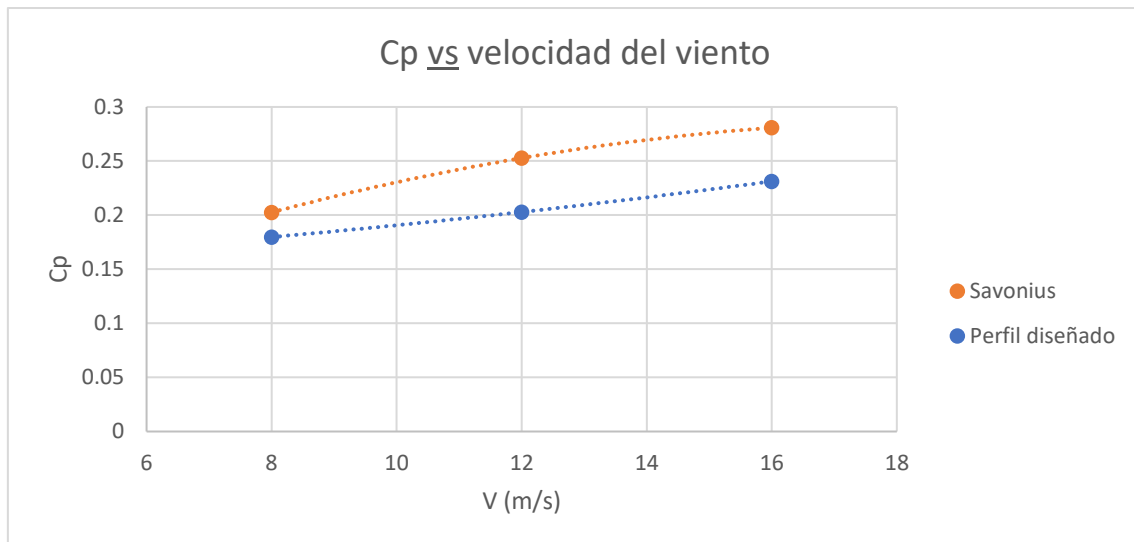
Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Stress	VON: Tensión de von Mises	1,996e+00N/m <sup>2</sup> Nodo: 8414	7,939e+06N/m <sup>2</sup> Nodo: 4420
Displacement	URES: Desplazamientos resultantes	0,000e+00mm Nodo: 536	2,613e-02mm Nodo: 4724
Factor of Safety	Tensión de von Mises máx.	2,141e+01 Nodo: 4420	8,515e+07 Nodo: 8414
<b>Conclusiones:</b> Las mayores tensiones se dan en la parte interior y se obtiene un <b>coeficiente de seguridad de 21.41</b> . Este es suficientemente elevado para asegurarnos de que la pieza no fallará (tampoco a fatiga).			

#### 4.4 COMPARACIÓN CON SAVONIUS

Para saber si el perfil que se ha diseñado es bueno o no, se ha realizado una comparación con el tradicional Savonius en S. Se han realizado 3 simulaciones a cada perfil con velocidades de viento de 8 m/s, 12 m/s y 16 m/s. Se han calculado los coeficientes de potencias de cada uno una vez las simulaciones se han estabilizado. Estos han sido los resultados obtenidos:



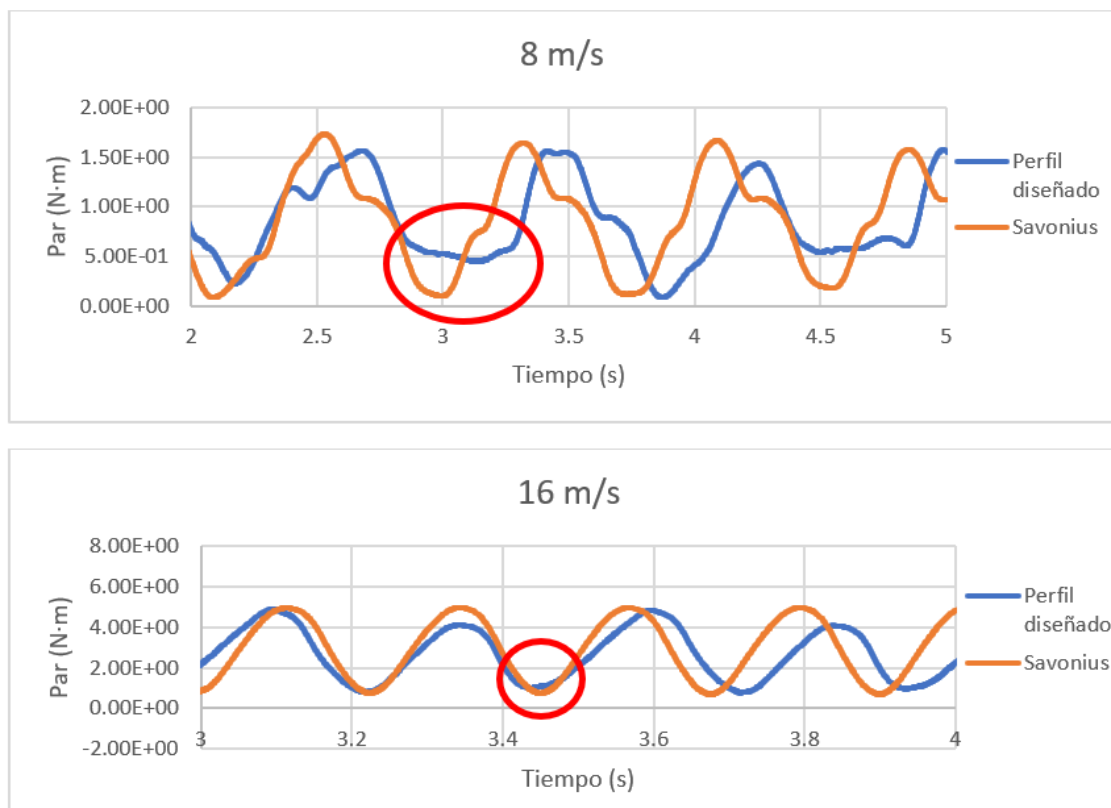
57. Fig. Comparación del par entre el perfil diseñado y el Savonius



58. Fig. Cp vs velocidad del viento entre el perfil diseñado y el Savonius

### Análisis de resultados

Los resultados obtenidos muestran claramente que el perfil diseñado tiene peores características aerodinámicas que el tradicional perfil en S. No solo eso, se puede ver que conforme aumenta la velocidad del viento la diferencia es aun mayor. A velocidades de 8 m/s el perfil diseñado tiene una eficiencia entorno al 10 % menor, mientras que a velocidades de 16 m/s la caída esta entorno al 20 %.

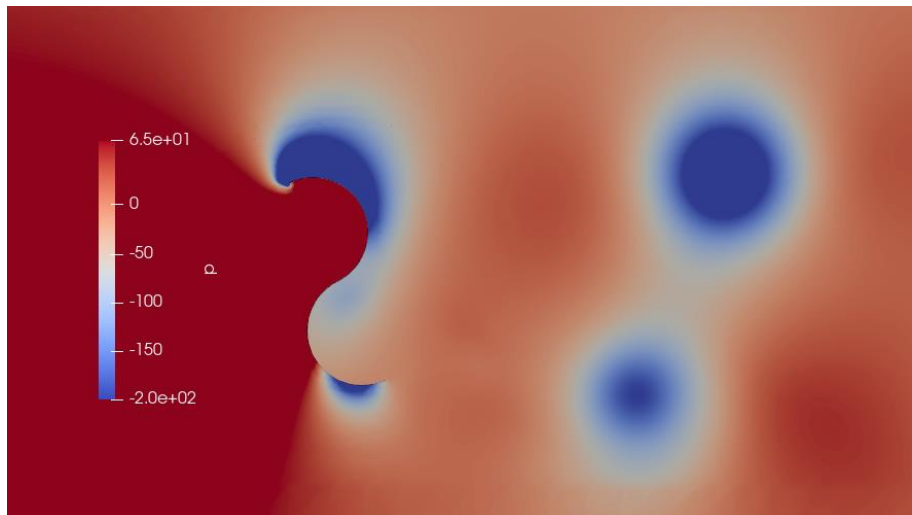


59. Fig. Comparación del par a vientos de 8 m/s y 16 m/s

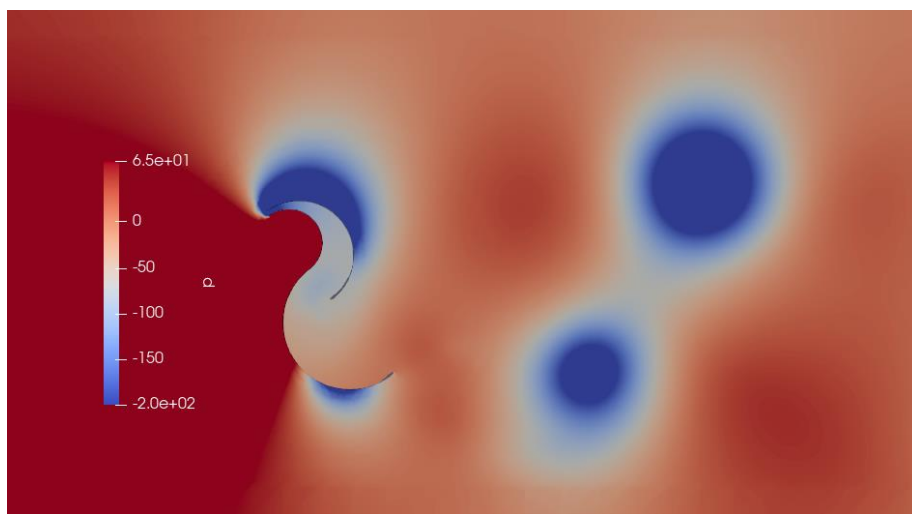
Jon Cerrada Garcés

Esta diferencia también se ve en el par generado. A 8m/s el perfil diseñado genera ese extra de par gracias a el efecto de el escape del aire, pero a velocidades de 16 m/s ese extra de par se pierde.

Otra forma de ver de donde viene la diferencia de eficiencias de ambos perfiles es analizando las turbulencias que generan. Cuanta más turbulencia generan más pérdidas hay y menor eficiencia tienen.



a) Burbujas de depresión del Savonius



b) Burbujas de depresión del perfil diseñado

60. Fig. Comparación de las turbulencias generadas

Puede verse que las zonas de vorticidad que genera el perfil de diseño propio son algo mayores y de mayor intensidad que las de el Savonius.

## 4.5 CONCLUSIONES

Una vez obtenidos todos los resultados de las simulaciones CFD y los análisis de tensiones, y habiendo analizado los datos obtenidos, se puede concluir lo siguiente:

- El nuevo diseño de perfil propuesto debe tener:
  - Un ancho de la vida de escape del aire de 3 cm.
  - Un ángulo de arco de la cazoleta mediana de 180 °.
  - Un aumento del ángulo de arco de la cazoleta grande de 2 °.
- El perfil estudiado, con la optimización realizada en este trabajo, no es capaz de mejorar las características aerodinámicas del Savonius tradicional. Un estudio más profundo es necesario para poder confirmar esta conclusión.
- El CFD, y en concreto OpenFOAM, es una herramienta muy potente para analizar casos aerodinámicos de este índole.
- Es importante realizar un análisis de tensiones de los componentes para saber si son capaces de resistir en funcionamiento y para saber si han sido excesivamente sobredimensionados y requieren ser aligerados.
- Un buen diseño será el que tenga en consideración el mayor número de aspectos técnicos posibles, como por ejemplo: El proceso de fabricación, el futuro mantenimiento, la eficiencia del mecanismo, etc.

## 5. VISTA A FUTURO

Si bien en este trabajo se ha llegado a unas conclusiones, en absoluto se pueden dar estas por definitivas. El estudio que se ha realizado para llegar a ellas puede ser más avanzado y profundo utilizando diferentes herramientas que no han sido utilizadas en este caso.

- La aplicación de técnicas de optimización de una red neuronal artificial para encontrar la geometría ideal de perfil habría obtenido unos resultados muy diferentes y considerablemente superiores.
- Un estudio de modelo CFD en 3D habría permitido aplicar y estudiar variaciones geométricas adicionales.
- Un diseño avanzado y más al detalle de los componentes mecánicos.

El uso de estas herramientas son consideradas líneas de trabajo interesantes para una futura continuación de este trabajo.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] REE, «Red Eléctrica de España,» [En línea]. Available: <https://www.ree.es/es>. [Último acceso: 9 Mayo 2022].
- [2] La Vanguardia, «La inflación de marzo en España apunta al 9%,» *La Vanguardia*, p. 1, 25 4 2022.
- [3] «En Estado Crudo,» 27 Agosto 2019. [En línea]. Available: <https://www.enestadocrudo.com/temperatura-global-aumento/>. [Último acceso: 9 Mayo 2022].
- [4] A. E.-H. E. W. M. N. N.H. Mahmoud, «An experimental study on improvement of Savonius,» *Alexandria University*, 2010.
- [5] S. K. S. P. M.A. Kamoji, «Experimental investigations on single stage modified Savonius rotor,» *Elsevier*, 2008.
- [6] S. V. M. A. P. P. Leonardo Brito Kothe, «Numerical and experimental study of a helical Savonius wind turbine,» *Elsevier*, 2019.
- [7] S. T. D. M. U.K. Saha, «Optimum design configuration of Savonius rotor,» *Elsevier*, 2008.
- [8] C. T. N. D. R. R. T. C. Saowalak Thongdee, «Study on performance of a savonius wind turbines related with,» *Maejo International Journal of Energy and Environmental Communication*, 2019.
- [9] «Premium Energía,» [En línea]. Available: <https://premiumenergia.es/historia-de-la-energia-eolica/>. [Último acceso: 9 Mayo 2022].
- [10] F. B. I. A. Kumail Abdulkareem Hadi Al-Gburi, «A comparative study review: The performance of Savonius-type rotors,» *Elsevier*.





## ANEXOS

## ANEXO 1 : FICHAS TÉCNICAS




## 6006

- Ítem popular  
- SKF Explorer

## Rodamientos rígidos de bolas

## Datos de los rodamientos

Tolerancias,

Normales (métricas), P6, P5, Normales  
(en pulgadas),

Juego radial interno,

Clases C2 a C5

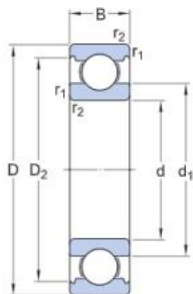
## Interfaces del rodamiento

Tolerancias de los asientos

para condiciones estándares,

Tolerancias y ajustes resultantes

## Especificación técnica

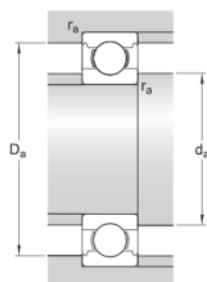


## DIMENSIONES

d	30 mm	Diámetro del agujero
D	55 mm	Diámetro exterior
B	13 mm	Ancho
d <sub>1</sub>	≈ 38.2 mm	Diámetro del resalte
D <sub>2</sub>	≈ 49 mm	Diámetro de rebaje
r <sub>1,2</sub>	min. 1 mm	Dimensión del chaflán

## DIMENSIONES DE LOS RESALTES

d <sub>i</sub> min.	34.6 mm	Diámetro del resalte del eje
D max.	50.4 mm	Diámetro del resalte del soporte
r <sub>a</sub> max.	1 mm	Radio del eje o acuerdo del soporte



#### DATOS DEL CÁLCULO

Capacidad de carga dinámica básica	$C$	13.8 kN
Capacidad de carga estática básica	$C_0$	8.3 kN
Carga límite de fatiga	$P_u$	0.355 kN
Velocidad de referencia		28 000 r/min
Velocidad límite		17 000 r/min
Factor de carga mínima	$k_r$	0.025
Factor de cálculo	$f_0$	15

#### MASA

Masa de rodamiento	0.12 kg
--------------------	---------

#### CLASE DE TOLERANCIA

Tolerancias dimensionales	P6
Desviación radial	P6



## 32006 X

- Ítem popular

### Rodamientos de una hilera de rodillos cónicos

#### Datos de los rodamientos

Tolerancias,  
Normales y CL7C, CLN, Normales y CL,  
ancho de desviación

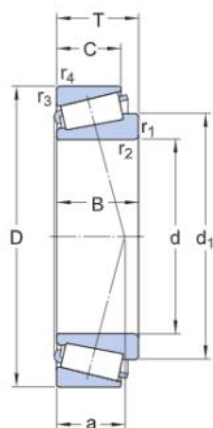
#### Interfaces del rodamiento

Tolerancias de los asientos  
para condiciones estándares,  
Tolerancias y ajuste resultante

## Especificación técnica

Series de dimensiones

4CC

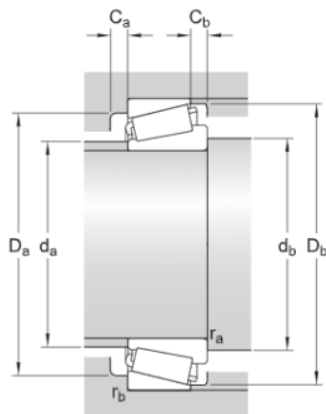


### DIMENSIONES

d	30 mm	Diámetro del agujero
D	55 mm	Diámetro exterior
T	17 mm	Ancho total del rodamiento
d <sub>1</sub>	≈ 43.6 mm	Diámetro del reborde del aro interior
B	17 mm	Ancho del aro interior
C	13 mm	Ancho del aro exterior
r <sub>1,2</sub>	min. 1 mm	Radio angular del aro interior
r <sub>3,4</sub>	min. 1 mm	Radio angular del aro exterior
a	13.165 mm	Distancia del punto de presión

### DIMENSIONES DE LOS RESALTES

d <sub>a</sub>	max. 36 mm	Diámetro del resalte del eje
d <sub>b</sub>	min. 37 mm	Diámetro del resalte del eje



$D_a$	min. 48 mm	Diámetro del resalte del soporte
$D_a$	max. 49 mm	Diámetro del resalte del soporte
$D_b$	min. 52 mm	Diámetro del resalte del soporte
$C_a$	min. 3 mm	Resalte del soporte y el espacio axial en la cara lateral más grande/a ambos lados del aro exterior
$C_b$	min. 4 mm	Resalte del soporte y el espacio axial en la cara lateral pequeña/a ambos lados del aro exterior
$r_a$	max. 1 mm	Radio de acuerdo
$r_b$	max. 1 mm	Radio de acuerdo

### DATOS DEL CÁLCULO

Capacidad de carga dinámica básica	C	43.9 kN
Capacidad de carga estática básica	$C_0$	44 kN
Carga límite de fatiga	$P_u$	4.55 kN
Velocidad de referencia		10 000 r/min
Velocidad límite		12 000 r/min
Factor de cálculo	e	0.43
Factor de cálculo	Y	1.4
Factor de cálculo	$Y_0$	0.8

### MASA

Masa de rodamiento	0.17 kg
--------------------	---------



# 32936

- Ítem popular

## Rodamientos de una hilera de rodillos cónicos

### Datos de los rodamientos

Tolerancias,  
Normales y CL7C, CLN, Normales y CL,  
ancho de desviación

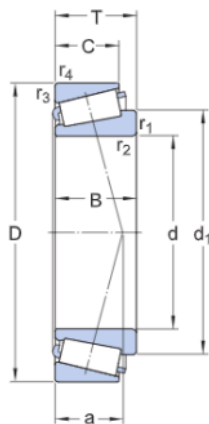
### Interfaces del rodamiento

Tolerancias de los asientos  
para condiciones estándares,  
Tolerancias y ajuste resultante

## Especificación técnica

Series de dimensiones

4DC

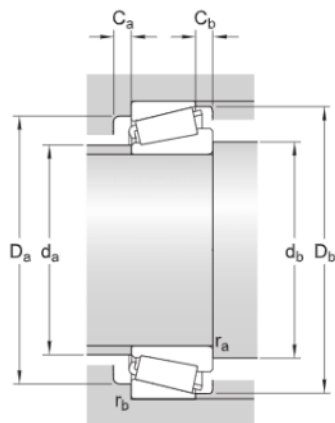


### DIMENSIONES

d	180 mm	Diámetro del agujero
D	250 mm	Diámetro exterior
T	45 mm	Ancho total del rodamiento
$d_1$	≈ 216.5 mm	Diámetro del reborde del aro interior
B	45 mm	Ancho del aro interior
C	34 mm	Ancho del aro exterior
$r_{1,2}$	min. 2.5 mm	Radio angular del aro interior
$r_{3,4}$	min. 2 mm	Radio angular del aro exterior
a	53.376 mm	Distancia del punto de presión

### DIMENSIONES DE LOS RESALTES

$d_a$	max. 194 mm	Diámetro del resalte del eje
$d_b$	min. 194 mm	Diámetro del resalte del eje



D <sub>a</sub>	min. 225 mm	Diámetro del resalte del soporte
D <sub>a</sub>	max. 238 mm	Diámetro del resalte del soporte
D <sub>b</sub>	min. 241 mm	Diámetro del resalte del soporte
C <sub>a</sub>	min. 8 mm	Resalte del soporte y el espacio axial en la cara lateral más grande/a ambos lados del aro exterior
C <sub>b</sub>	min. 11 mm	Resalte del soporte y el espacio axial en la cara lateral pequeña/a ambos lados del aro exterior
r <sub>a</sub>	max. 2.5 mm	Radio de acuerdo
r <sub>b</sub>	max. 2 mm	Radio de acuerdo

## DATOS DEL CÁLCULO

Capacidad de carga dinámica básica	C	435 kN
Capacidad de carga estática básica	C <sub>0</sub>	735 kN
Carga límite de fatiga	P <sub>u</sub>	68 kN
Velocidad de referencia		1 900 r/min
Velocidad límite		2 200 r/min
Factor de cálculo	e	0.48
Factor de cálculo	Y	1.25
Factor de cálculo	Y <sub>0</sub>	0.7

## MASA

Masa de rodamiento	6.65 kg
--------------------	---------

## PLANOS

PLANO 00-A: Conjunto general A

PLANO 00-B: Conjunto general B

PLANO 00-01: Rotor

PLANO 00-02: Corona

PLANO 00-03: Carcasa inferior

PLANO 00-04: Carcasa mediana

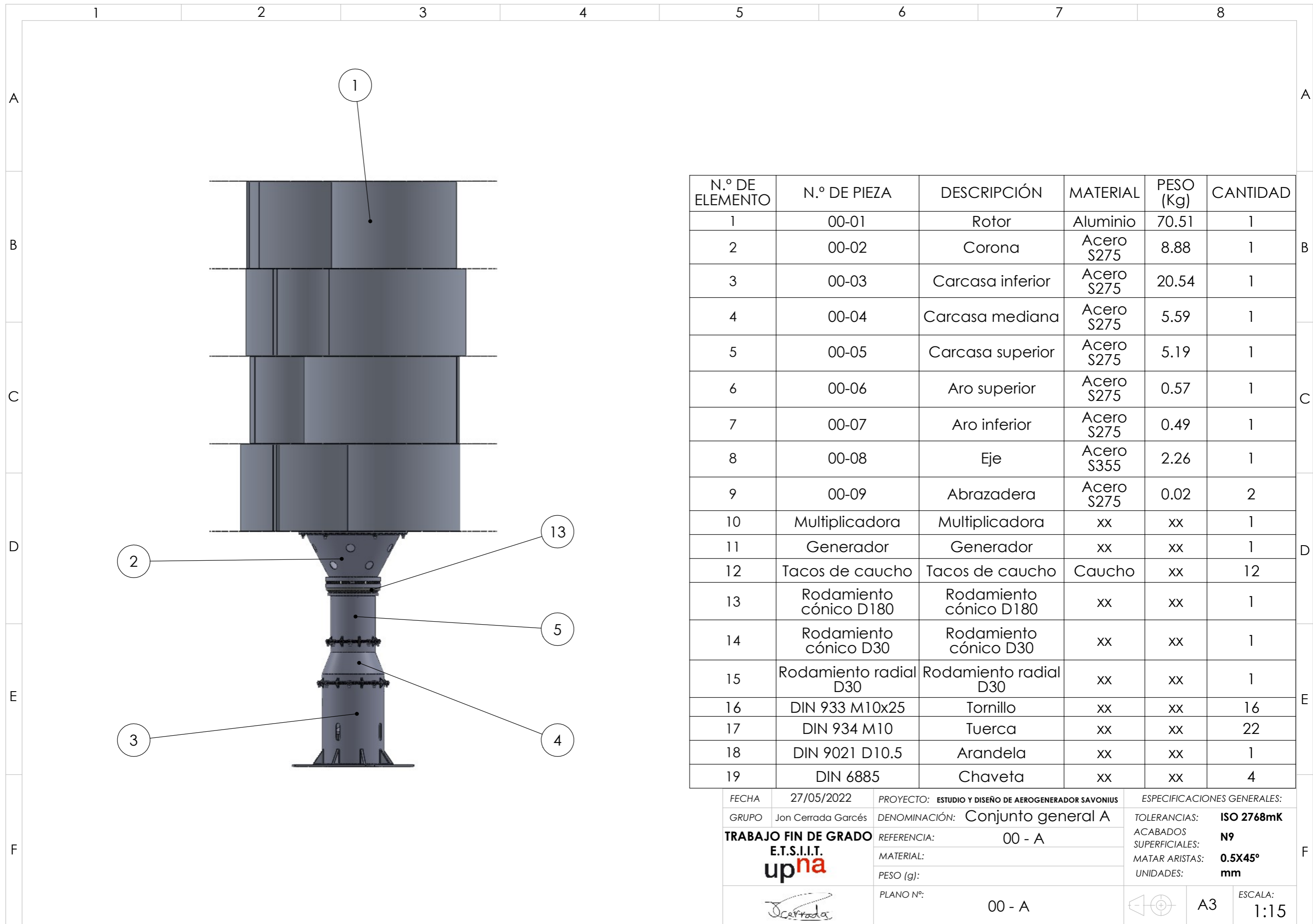
PLANO 00-05: Carcasa superior

PLANO 00-06: Aro superior

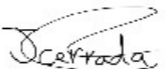

PLANO 00-07: Aro inferior

PLANO 00-08: Eje

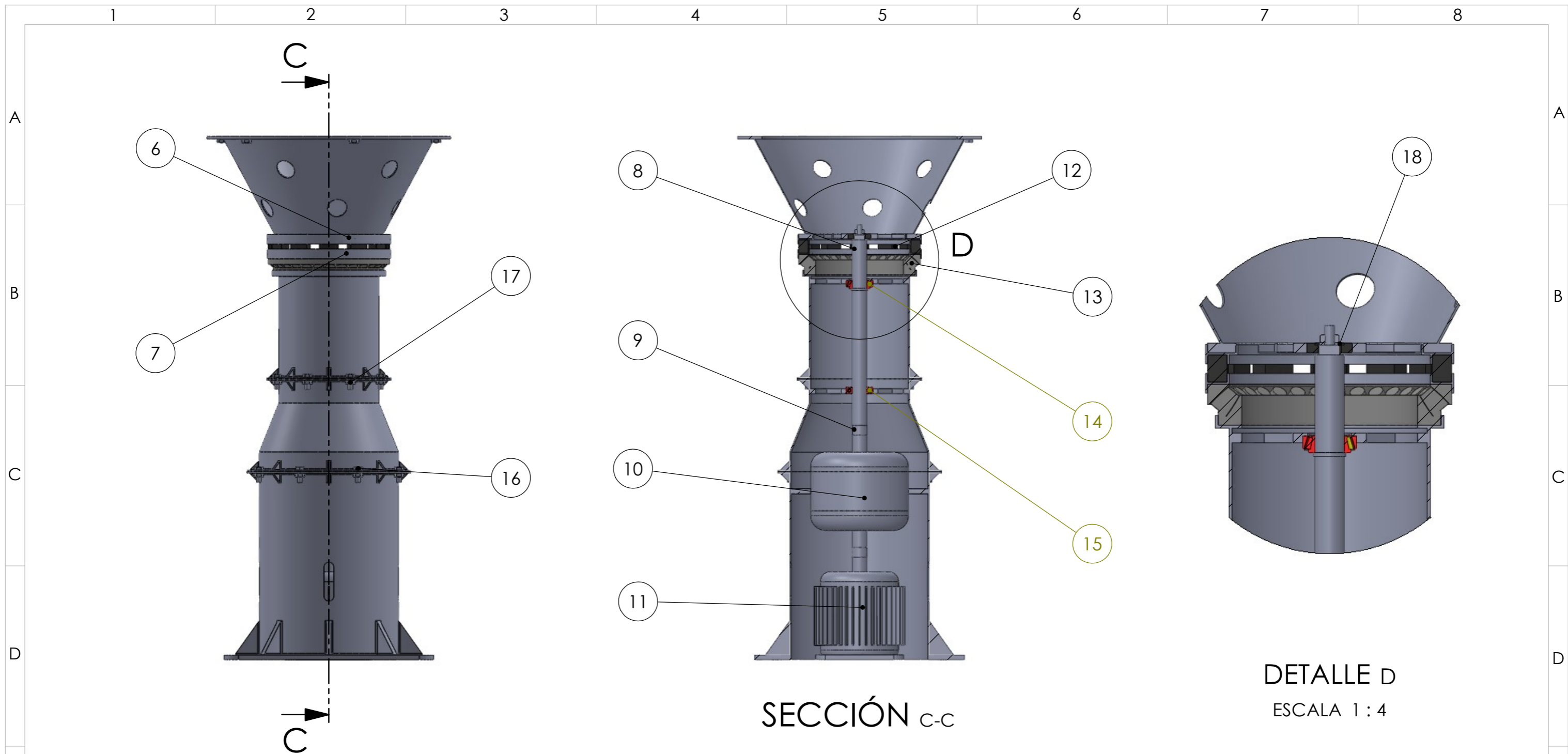
PLANO 00-09: Abrazadera



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	MATERIAL	PESO (Kg)	CANTIDAD
1	00-01	Rotor	Aluminio	70.51	1
2	00-02	Corona	Acero S275	8.88	1
3	00-03	Carcasa inferior	Acero S275	20.54	1
4	00-04	Carcasa mediana	Acero S275	5.59	1
5	00-05	Carcasa superior	Acero S275	5.19	1
6	00-06	Aro superior	Acero S275	0.57	1
7	00-07	Aro inferior	Acero S275	0.49	1
8	00-08	Eje	Acero S355	2.26	1
9	00-09	Abrazadera	Acero S275	0.02	2
10	Multiplicadora	Multiplicadora	xx	xx	1
11	Generador	Generador	xx	xx	1
12	Tacos de caucho	Tacos de caucho	Caucho	xx	12
13	Rodamiento cónico D180	Rodamiento cónico D180	xx	xx	1
14	Rodamiento cónico D30	Rodamiento cónico D30	xx	xx	1
15	Rodamiento radial D30	Rodamiento radial D30	xx	xx	1
16	DIN 933 M10x25	Tornillo	xx	xx	16
17	DIN 934 M10	Tuerca	xx	xx	22
18	DIN 9021 D10.5	Arandela	xx	xx	1
19	DIN 6885	Chaveta	xx	xx	4

FECHA	27/05/2022	PROYECTO:	ESTUDIO Y DISEÑO DE AEROGENERADOR SAVONIUS	ESPECIFICACIONES GENERALES:	
GRUPO	Jon Cerrada Garcés	DENOMINACIÓN:	Conjunto general A	TOLERANCIAS:	ISO 2768mK
<b>TRABAJO FIN DE GRADO</b> <b>E.T.S.I.I.T.</b> <b>upna</b>	REFERENCIA:	00 - A		ACABADOS SUPERFICIALES:	N9
	MATERIAL:			MATAR ARISTAS:	0.5X45°
	PESO (g):			UNIDADES:	mm
	PLANO N.º:	00 - A			ESCALA:
					A3





SECCIÓN C-C

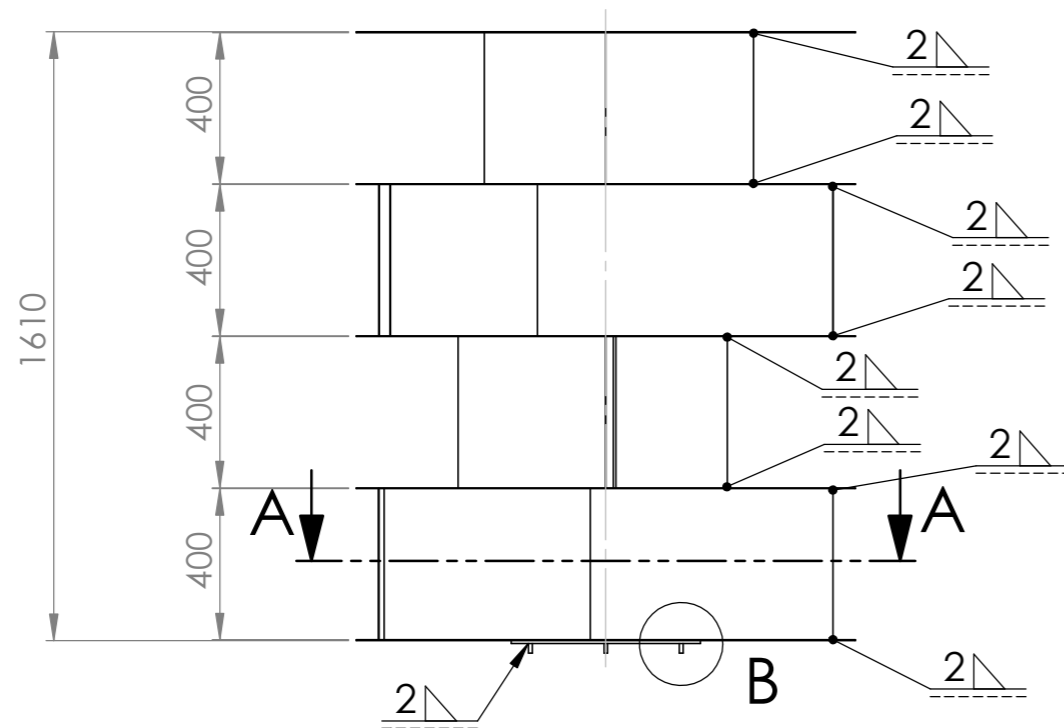
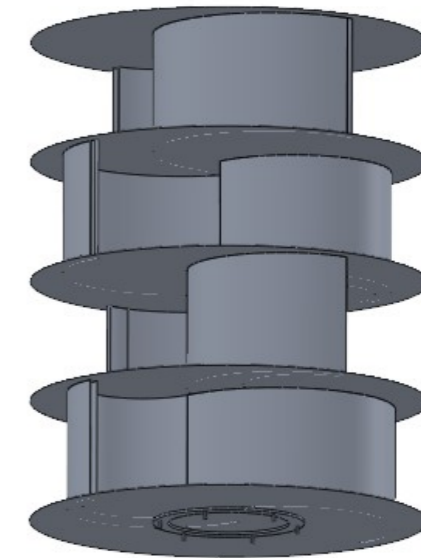
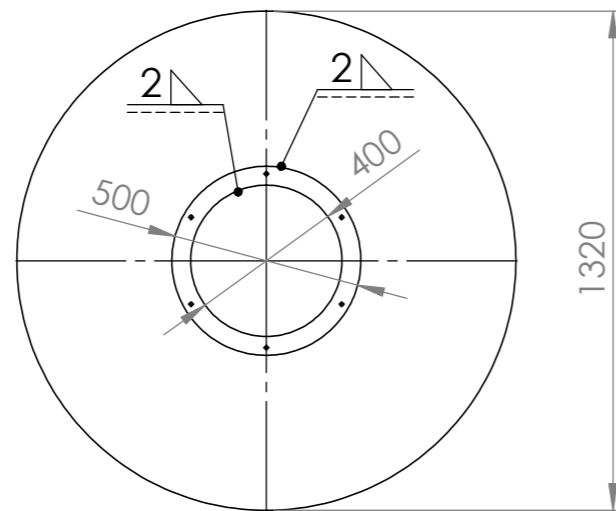
DETALLE D

ESCALA 1 : 4

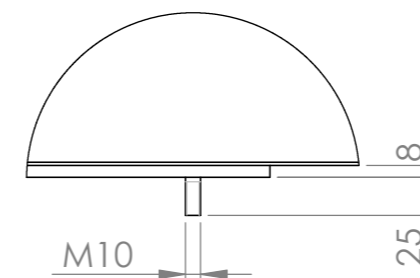
N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	MATERIAL	PESO (Kg)	CANTIDAD
6	00-06	Aro superior	Acero S275	0.57	1
7	00-07	Aro inferior	Acero S275	0.49	1
8	00-08	Eje	Acero S355	2.26	1
9	00-09	Abrazadera	Acero S275	0.02	2
10	Multiplicadora	Multiplicadora	xx	xx	1
11	Generador	Generador	xx	xx	1
12	Tacos de caucho	Tacos de caucho	Caucho	xx	12
13	Rodamiento cónico D180	Rodamiento cónico D180	xx	xx	1
14	Rodamiento cónico D30	Rodamiento cónico D30	xx	xx	1
15	Rodamiento radial D30	Rodamiento radial D30	xx	xx	1

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
16	DIN 933 M10x25	Tornillo	16
17	DIN 934 M10	Tuerca	22
18	DIN 9021 D10.5	Arandela	1

FECHA	27/05/2022	PROYECTO:	ESTUDIO Y DISEÑO DE AEROGENERADOR SAVONIUS	ESPECIFICACIONES GENERALES:	
GRUPO	Jon Cerrada Garcés	DENOMINACIÓN:	Conjunto general B	TOLERANCIAS:	ISO 2768mK
TRABAJO FIN DE GRADO E.T.S.I.I.T. <b>upna</b>		REFERENCIA:	00 - B	ACABADOS SUPERFICIALES:	N9
		MATERIAL:		MATAR ARISTAS:	0.5X45°
		PESO (g):		UNIDADES:	mm
		PLANO N.º:	00 - B	ESCALA:	1:8

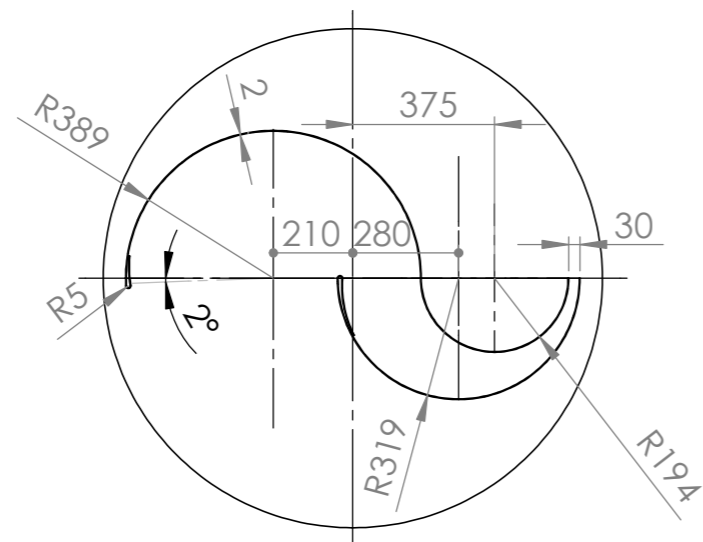


**NOTA:**  
 EL ROTOR TIENE 4 SECCIONES IGUALES SITUADAS UNA ENCIMA DE LA OTRA Y ROTADAS 90° CADA UNA.  
 TODAS LAS CHAPAS TIENEN UN ESPESOR DE 2 mm.

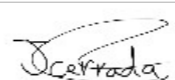



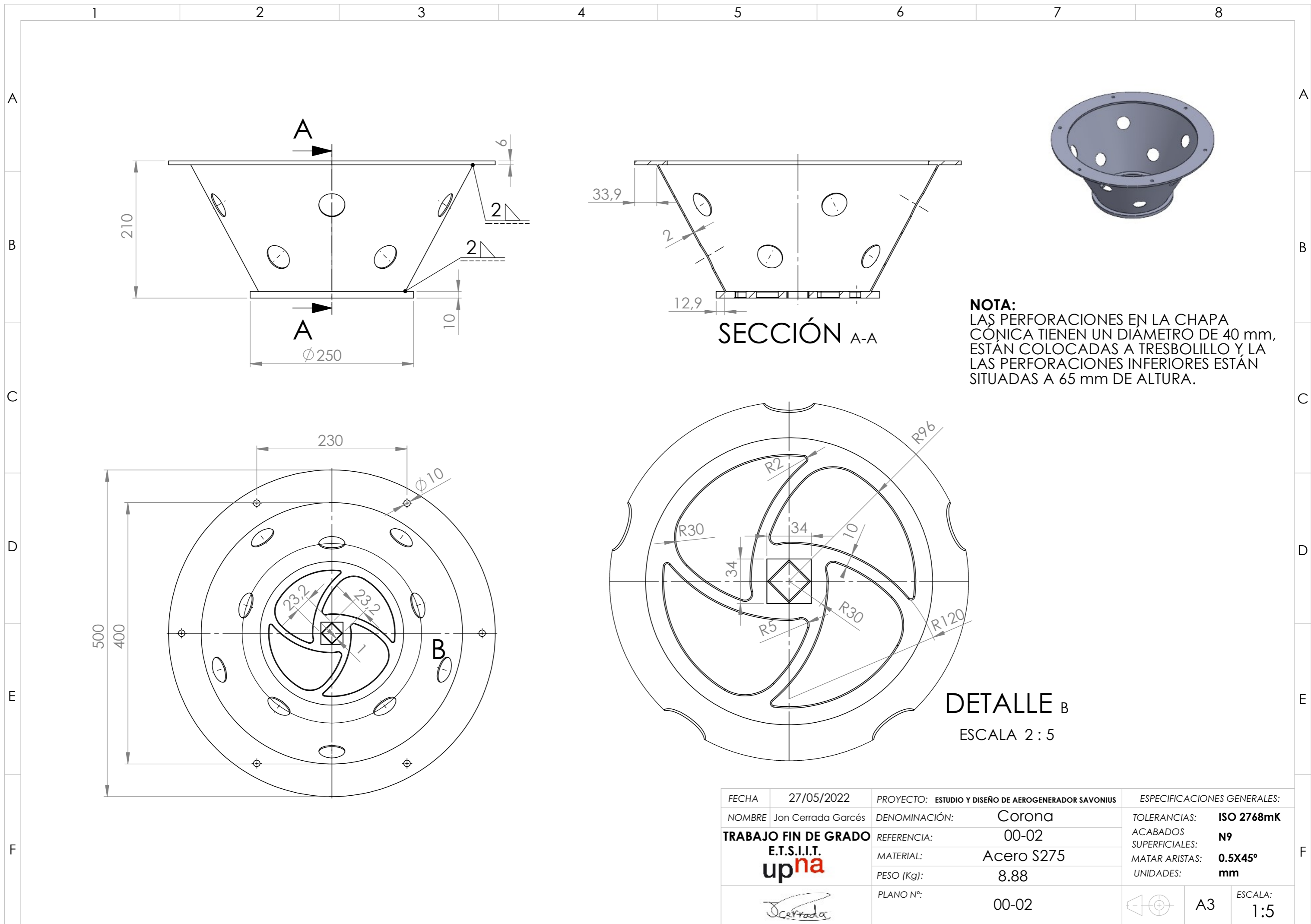
DETALLE B

ESCALA 1 : 5



SECCIÓN A-A

FECHA	27/05/2022	PROYECTO: ESTUDIO Y DISEÑO DE AEROGENERADOR SAVONIUS	ESPECIFICACIONES GENERALES:
NOMBRE	Jon Cerrada Garcés	DENOMINACIÓN: Rotor	TOLERANCIAS: ISO 2768mK
TRABAJO FIN DE GRADO E.T.S.I.I.T. upna	REFERENCIA:	00 - 1	ACABADOS SUPERFICIALES: N9
	MATERIAL:	Aluminio	MATAR ARISTAS: 0.5X45°
	PESO (Kg):	70.51	UNIDADES: mm
	PLANO Nº:	00 - 1	 A3 ESCALA: 1:20

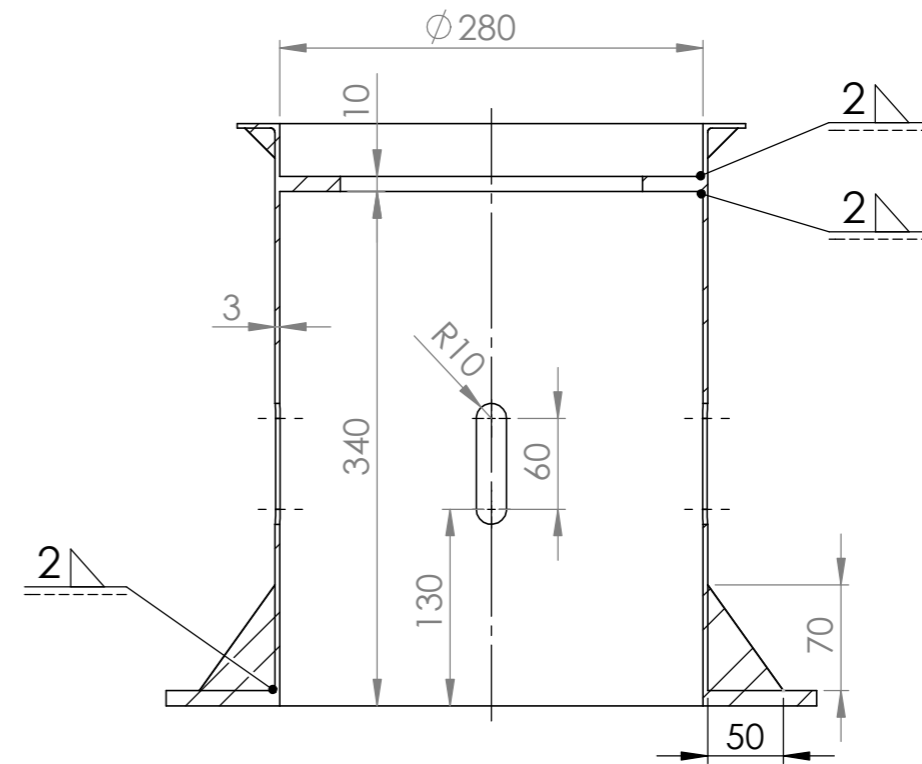
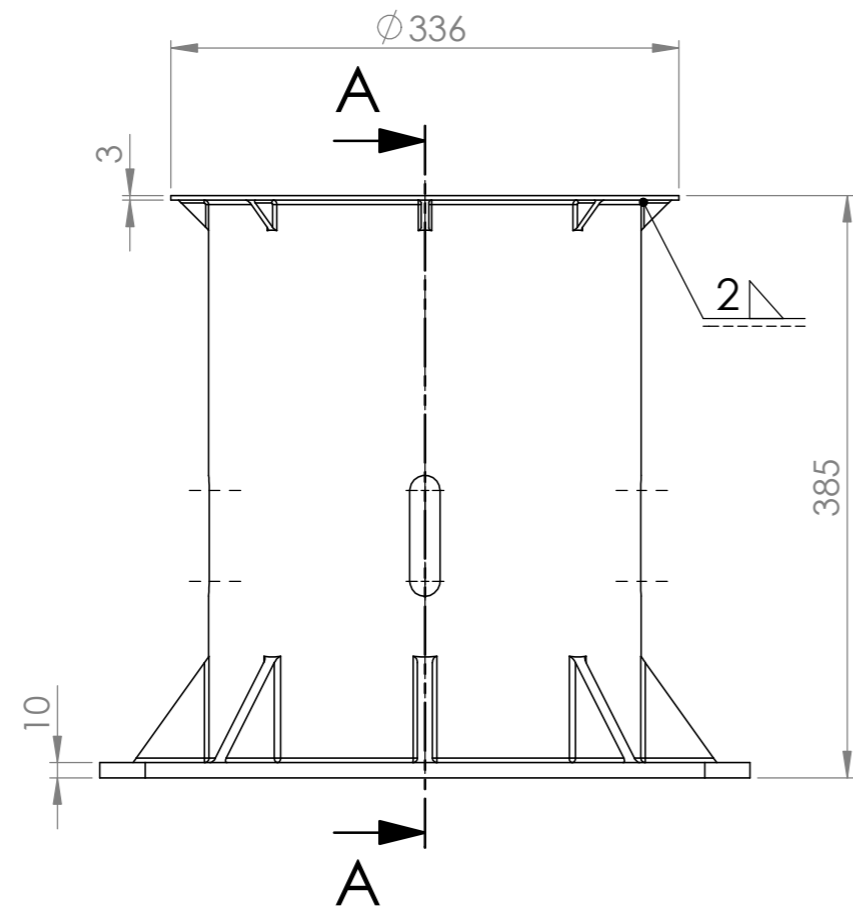


**NOTA:**  
 LAS PERFORACIONES EN LA CHAPA  
 CÓNICA TIENEN UN DIÁMETRO DE 40 mm,  
 ESTÁN COLOCADAS A TRESBOLILLO Y LA  
 LAS PERFORACIONES INFERIORES ESTÁN  
 SITUADAS A 65 mm DE ALTURA.

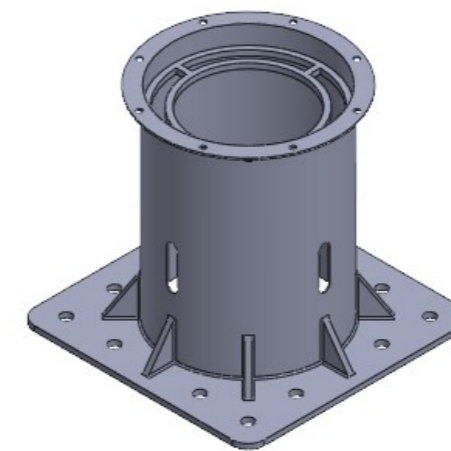
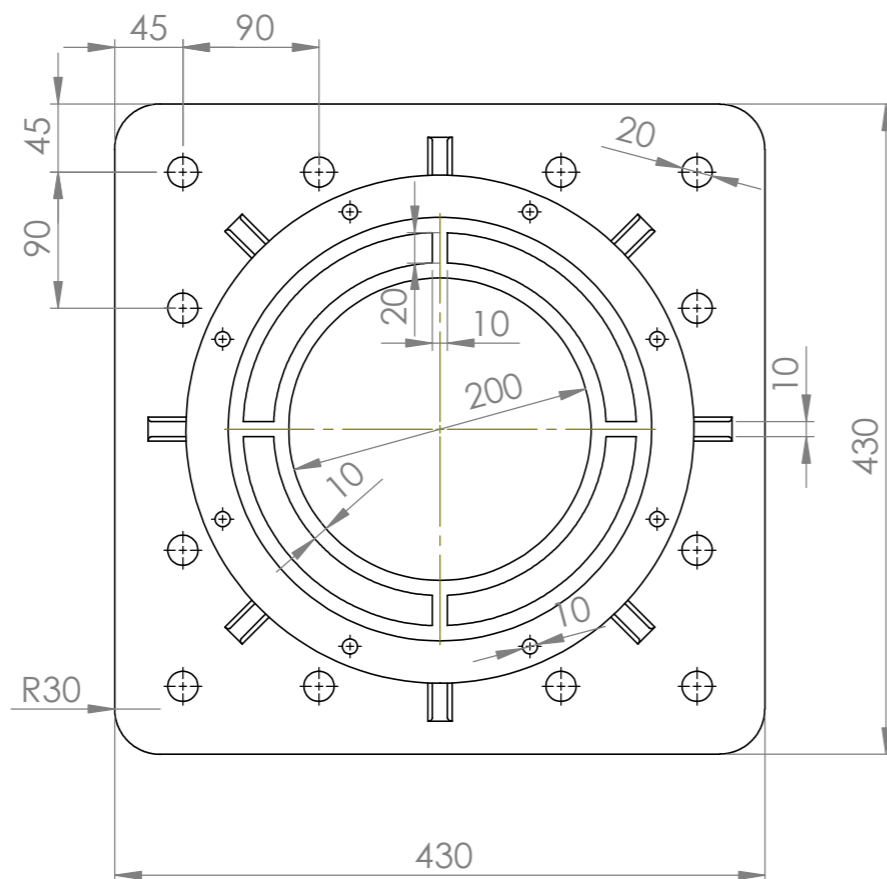
SECCIÓN A-A

DETALLE B  
 ESCALA 2 : 5

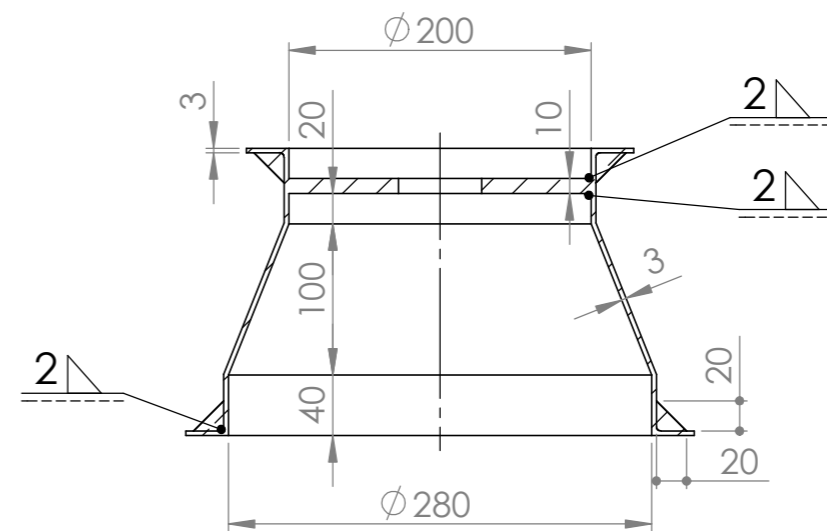
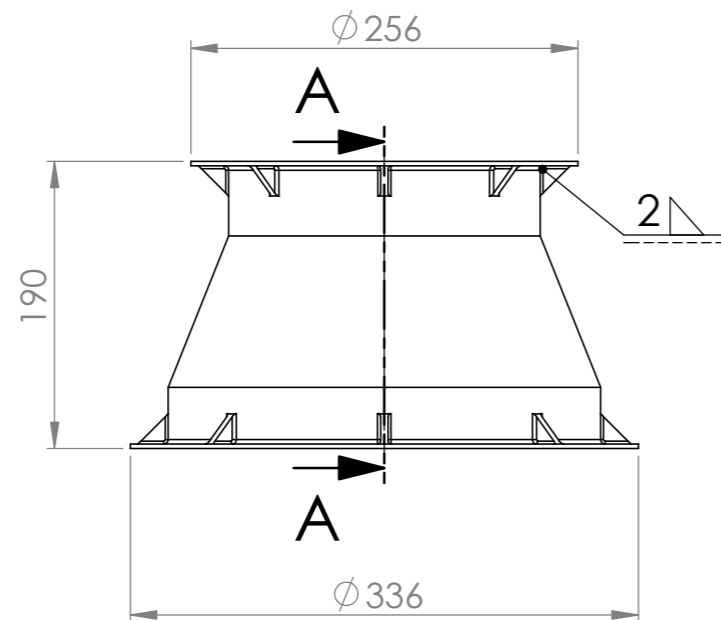
FECHA	27/05/2022	PROYECTO:	ESTUDIO Y DISEÑO DE AEROGENERADOR SAVONIUS	ESPECIFICACIONES GENERALES:	
NOMBRE	Jon Cerrada Garcés	DENOMINACIÓN:	Corona	TOLERANCIAS:	ISO 2768mK
TRABAJO FIN DE GRADO E.T.S.I.I.T. <b>upna</b>		REFERENCIA:	00-02	ACABADOS SUPERFICIALES:	N9
		MATERIAL:	Acero S275	MATAR ARISTAS:	0.5X45°
		PESO (Kg):	8.88	UNIDADES:	mm
		PLANO Nº:	00-02	ESCALA:	1:5
	<i>J. Cerrada</i>			A3	



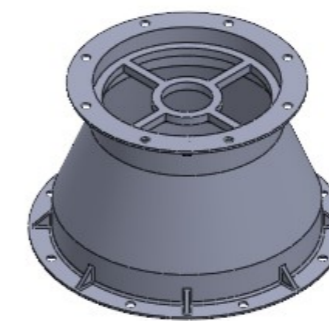
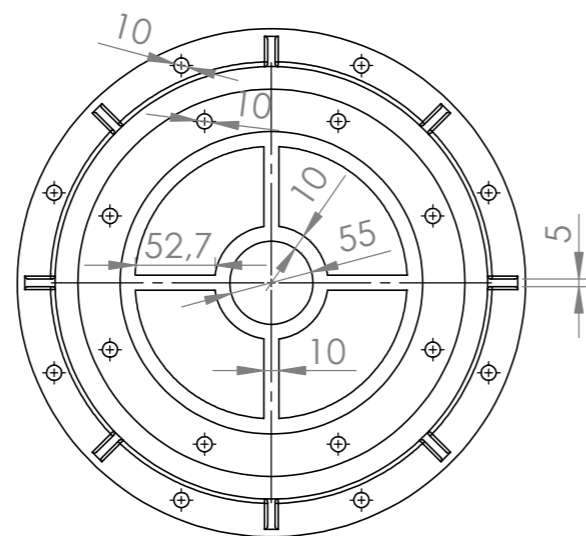
SECCIÓN A-A




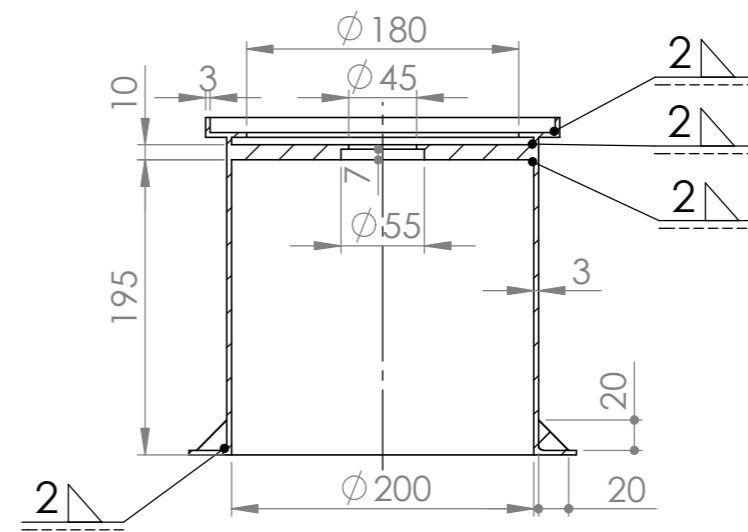
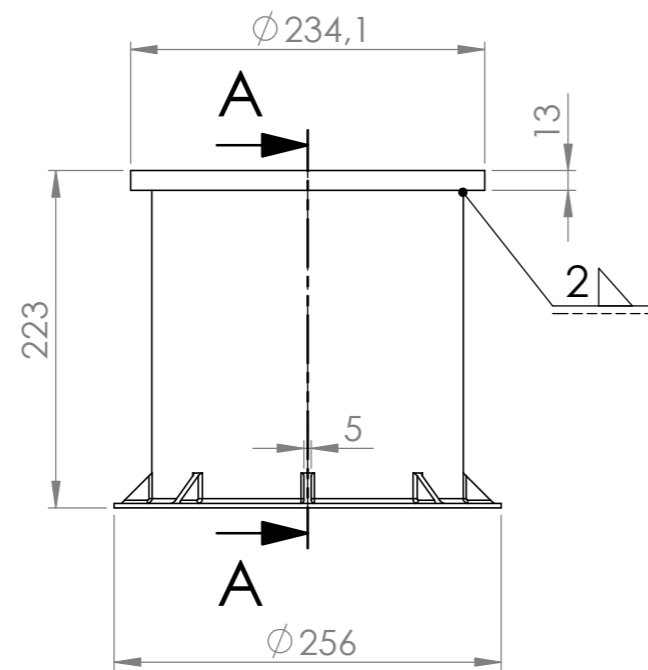
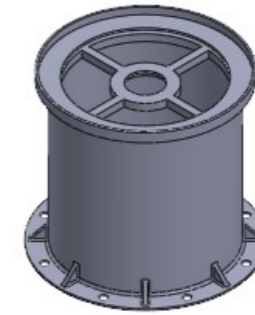
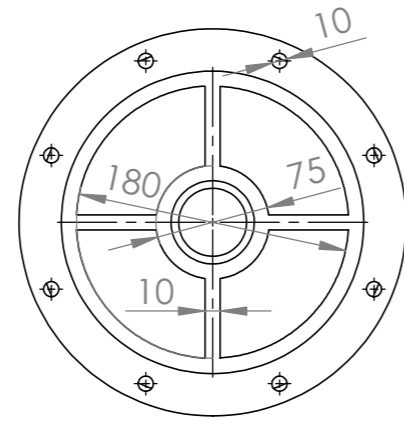
FECHA	27/05/2022	PROYECTO:	ESTUDIO Y DISEÑO DE AEROGENERADOR SAVONIUS	ESPECIFICACIONES GENERALES:		
NOMBRE	Jon Cerrada Garcés	DENOMINACIÓN:	Carcasa inferior	TOLERANCIAS:	ISO 2768mK	
<b>TRABAJO FIN DE GRADO</b> <b>E.T.S.I.I.T.</b> <b>upna</b>	REFERENCIA:	00-03	ACABADOS SUPERFICIALES:	N9		
	MATERIAL:	Acero S275	MATAR ARISTAS:	0.5X45°		
	PESO (Kg):	20.54	UNIDADES:	mm		
	PLANO N°:	00-03				
					A3	ESCALA: 1:5




SECCIÓN A-A

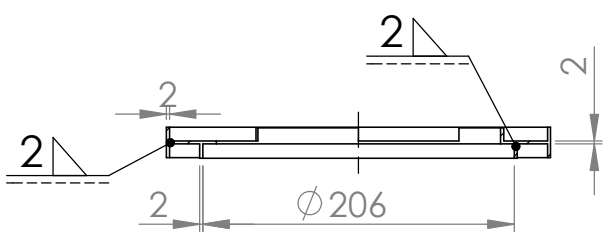
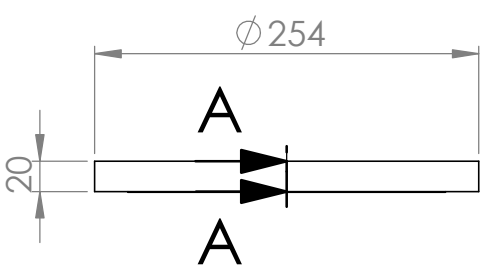
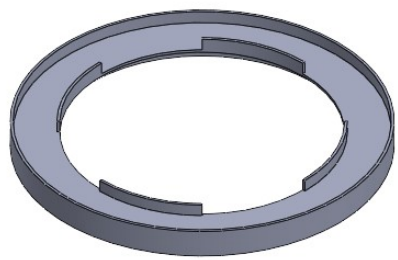


FECHA	27/05/2022	PROYECTO:	ESTUDIO Y DISEÑO DE AEROGENERADOR SAVONIUS	ESPECIFICACIONES GENERALES:	
NOMBRE	Jon Cerrada Garcés	DENOMINACIÓN:	Carcasa mediana	TOLERANCIAS:	ISO 2768mK
<b>TRABAJO FIN DE GRADO</b> <b>E.T.S.I.I.T.</b> <b>upna</b>	REFERENCIA:	00-04		ACABADOS SUPERFICIALES:	N9
	MATERIAL:	Acero S275		MATAR ARISTAS:	0.5X45°
	PESO (Kg):	5.59		UNIDADES:	mm
	PLANO Nº:	00-04			
					A3 ESCALA: 1:5

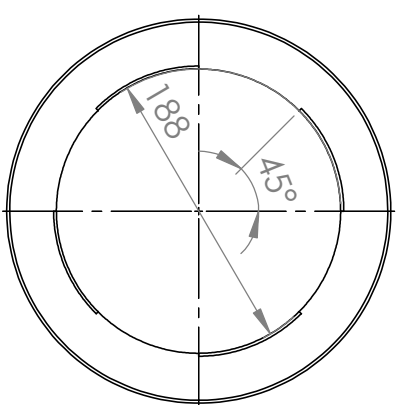


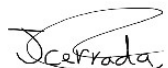


SECCIÓN A-A

FECHA	27/05/2022	PROYECTO:	ESTUDIO Y DISEÑO DE AEROGENERADOR SAVONIUS	ESPECIFICACIONES GENERALES:	
NOMBRE	Jon Cerrada Garcés	DENOMINACIÓN:	Carcasa superior	TOLERANCIAS:	ISO 2768mK
<b>TRABAJO FIN DE GRADO</b> <b>E.T.S.I.I.T.</b> <b>upna</b>	REFERENCIA:	00-05	ACABADOS SUPERFICIALES:	N9	
	MATERIAL:	Acero S275	MATAR ARISTAS:	0.5X45°	
	PESO (Kg):	5.19	UNIDADES:	mm	
	PLANO N°:	00-05			
	<i>J. Cerrada</i>			 A3	ESCALA: 1:5



SECCIÓN A-A



FECHA	27/05/2022	PROYECTO: ESTUDIO Y DISEÑO DE AEROGENERADOR SAVONIUS	ESPECIFICACIONES GENERALES:	
NOMBRE	Jon Cerrada Garcés	DENOMINACIÓN: Aro superior	TOLERANCIAS:	ISO 2768mK
TRABAJO FIN DE GRADO E.T.S.I.I.T. <b>upna</b>	REFERENCIA:	00-06	ACABADOS SUPERFICIALES:	N9
	MATERIAL:	Acero S275	MATAR ARISTAS:	0.5X45°
	PESO (g):	570	UNIDADES:	mm
	PLANO N°:	00-06	 	ESCALA:
			A4	1:5

1

2

3

4

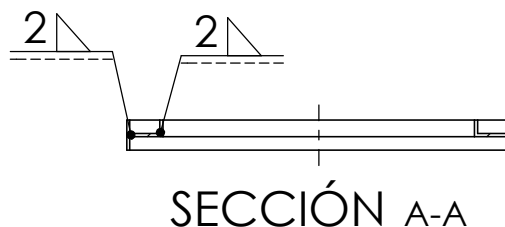
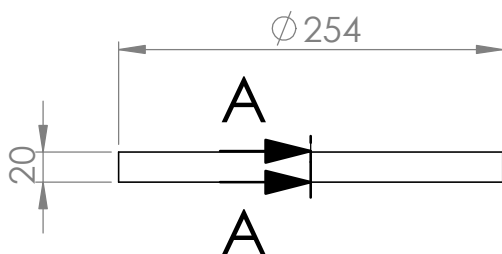
A

A



B

B

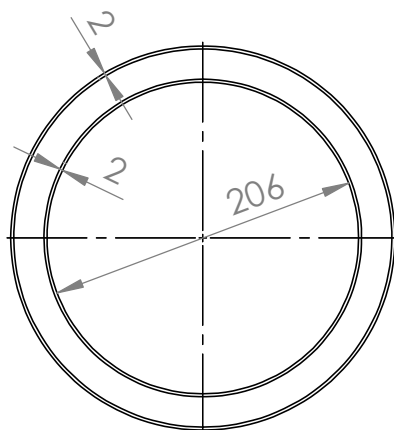


C

C

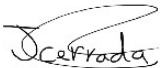
D

D



E

E

FECHA	27/05/2022	PROYECTO: ESTUDIO Y DISEÑO DE AEROGENERADOR SAVONIUS	ESPECIFICACIONES GENERALES:	
NOMBRE	Jon Cerrada Garcés	DENOMINACIÓN:	Aro inferior	TOLERANCIAS:
TRABAJO FIN DE GRADO E.T.S.I.I.T. <b>upna</b>		REFERENCIA:	00-07	ACABADOS SUPERFICIALES:
		MATERIAL:	Acero S275	MATAR ARISTAS:
		PESO (g):	490	UNIDADES:
		PLANO N°:	00-07	ESCALA:
				1:5

F

F

1

2

3

4



1

2

3

4

A

A

B

B

C

C

D

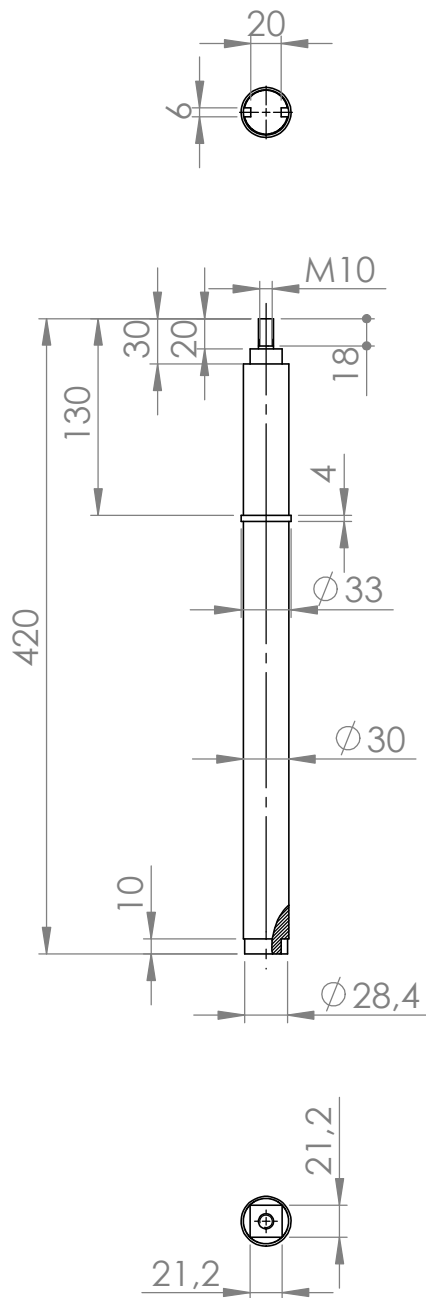
D

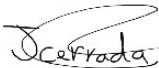


E

E

F

F



FECHA	27/05/2022	PROYECTO: ESTUDIO Y DISEÑO DE AEROGENERADOR SAVONIUS	ESPECIFICACIONES GENERALES:	
NOMBRE	Jon Cerrada Garcés	DENOMINACIÓN:	Eje	TOLERANCIAS:
TRABAJO FIN DE GRADO E.T.S.I.I.T. <b>upna</b>		REFERENCIA:	00-08	ACABADOS SUPERFICIALES:
		MATERIAL:	Acero S355	MATAR ARISTAS:
		PESO (Kg):	2.26	UNIDADES:
		PLANO N°:	00-08	ESCALA:
				1:5
			 	A4

1

2

3

4

1

2

3

4

A

A

B

B

C

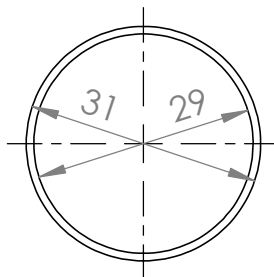
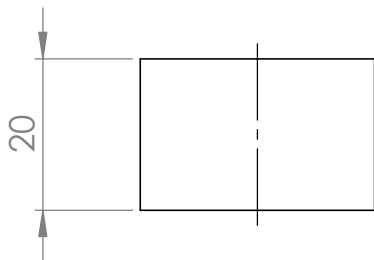
C

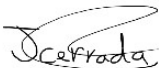


D

D

E

E



FECHA	27/05/2022	PROYECTO: ESTUDIO Y DISEÑO DE AEROGENERADOR SAVONIUS	ESPECIFICACIONES GENERALES:	
NOMBRE	Jon Cerrada Garcés	DENOMINACIÓN: Abrazadera	TOLERANCIAS:	ISO 2768mK
<b>TRABAJO FIN DE GRADO</b> <b>E.T.S.I.I.T.</b> <b>upna</b>	REFERENCIA:	00-09	ACABADOS SUPERFICIALES:	N9
	MATERIAL:	Acero S275	MATAR ARISTAS:	0.5X45°
	PESO (g):	20	UNIDADES:	mm
	PLANO N°:	00-09	 	A4
				ESCALA: 1:1

1

2

3

4